



БЕЗОПАСНОСТЬ

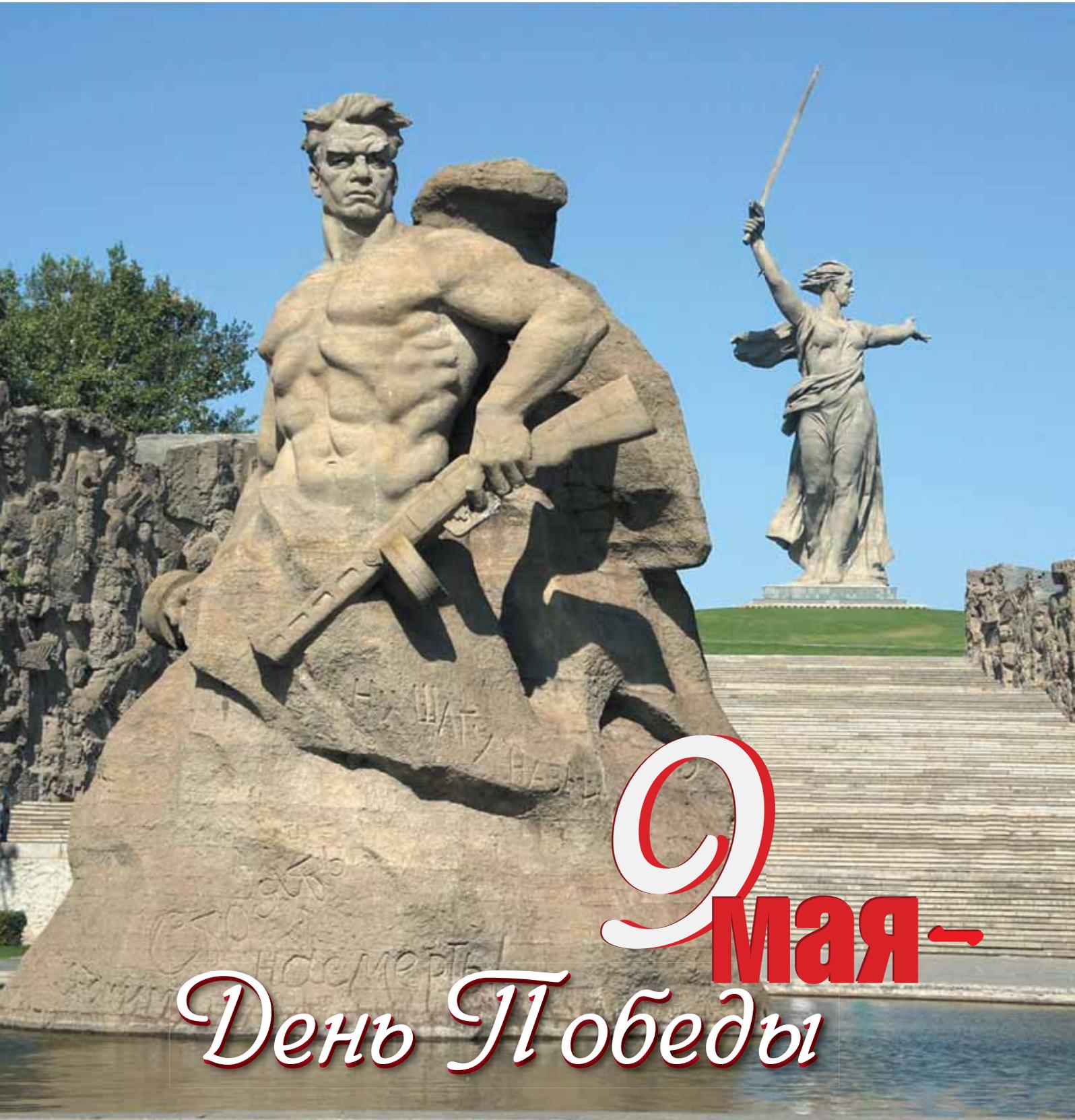
труда в промышленности

Occupational Safety in Industry

№ 5
2020

Ежемесячный научно-производственный журнал www.btpnadzor.ru

ISSN 0409-2961
eISSN 2658-5537



9 мая -
День Победы



Дорогие ветераны! Уважаемые коллеги, друзья!

От всего сердца поздравляю вас с Днем Победы — праздником, величие которого не меркнет с годами!

Прошло уже 75 лет с того дня, как закончилась Великая Отечественная война, когда советский народ спас весь мир от угрозы порабощения, отстоял свободу и независимость Отчизны.

9 Мая — день, который всегда будет самой значимой вехой нашей истории. Великая Победа завоевана колоссальной ценой и потребовала величайшего напряжения нашего народа. Мы бесконечно благодарны тем, кто на полях сражений жизнью заплатил за мир и свободу. Тем, кто возвел тысячи новых оборонных предприятий. Всем, кто на себе вынес тяготы и лишения военной поры, проявив беспримерное мужество на фронте и в тылу.

В этот день особенно остро чувствуется боль от невосполнимых потерь, которые война принесла в каждую семью. Но осознание смысла этой жертвы наполняет наши сердца гордостью и глубочайшим уважением к памяти ушедших.

Уважаемые ветераны! Спасибо за вашу самоотверженность в той каждодневной тяжелой борьбе за будущее новых поколений! Низкий вам поклон!

С праздником! С Днем Великой Победы!

**Руководитель Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору**

А.В. Алёшин



БЕЗОПАСНОСТЬ Труда в промышленности

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-43428

Журнал основан в январе 1932 г. Выпуск 761.

Редакционный совет

Алёшин А.В., канд. юр. наук, руководитель Ростехнадзора (Москва, Россия)

Буйновский С.Н., д-р техн. наук, главный редактор журнала (Москва, Россия)

Голик В.И., д-р техн. наук, проф., Северо-Кавказский государственный технологический университет (Владикавказ, Россия)

Грачёв В.А., д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, председатель Общественного совета при Ростехнадзоре (Москва, Россия)

Григорьев М.Н., канд. геол.-минерал. наук, акад. РАЕН, директор ООО «Гекон» (Санкт-Петербург, Россия)

Дмитриевский А.Н., д-р геол.-минерал. наук, проф., акад. РАН, науч. руководитель Института проблем нефти и газа РАН (Москва, Россия)

Егоров М.П., д-р хим. наук, акад. РАН, директор Института органической химии им. Н.Д. Зелинского РАН (Москва, Россия)

Кловач Е.В., д-р техн. наук, проф., ген. директор ЗАО НТЦ ПБ (Москва, Россия)

Клюев В.В., д-р техн. наук, проф., акад. РАН, почетный член РОНКТД (Москва, Россия)

Красных Б.А., канд. техн. наук, председатель НТС Ростехнадзора (Москва, Россия)

Мальшев Ю.Н., д-р техн. наук, проф., акад. РАН, почетный президент НП «Горнопромышленники России» (Москва, Россия)

Махутов Н.А., д-р техн. наук, проф., чл.-кор. РАН, ФГБУ науки Институт машиноведения им. А.А. Благоднарова РАН (Москва, Россия)

Печёркин А.С., д-р техн. наук, проф., первый зам. ген. директора ЗАО НТЦ ПБ (Москва, Россия)

Сидоров В.И., д-р техн. наук, проф., президент Фонда Якова Брюса (Москва, Россия)

Трембицкий А.В., зам. руководителя Ростехнадзора (Москва, Россия)

Трубецкой К.Н., д-р техн. наук, проф., акад. РАН, советник президиума РАН (Москва, Россия)

Ферапонтов А.В., канд. техн. наук, зам. руководителя Ростехнадзора (Москва, Россия)

Фролов Д.И., канд. экон. наук, зам. руководителя Ростехнадзора (Москва, Россия)

Шмаль Г.И., канд. экон. наук, президент Союза нефтегазопромышленников России (Москва, Россия)

№ 5 · 2020

Учредители



Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор)



Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ)

Издатель

ЗАО НТЦ ПБ: 105082, Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14, а/я 38
Тел.: +7 (495) 620-47-47;
факс: +7 (495) 620-47-46
ntc@safety.ru; www.safety.ru

Редакция

105082, Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14, а/я 38
Телефакс: +7 (495) 620-47-44; btp@safety.ru, redbtp@safety.ru; www.btpnadzor.ru
Отдел рекламы — К.М. Игнатова, ignatova@safety.ru.
Тел. +7 (495) 620-47-54

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук, сформированный **ВАК Минобрнауки России**.

Журнал включен в **Российский индекс научного цитирования** (двухлетний импакт-фактор РИНЦ без самоцитирования — 0,338, пятилетний импакт-фактор РИНЦ без самоцитирования — 0,303, десятилетний индекс Хирша — 20) и международные базы данных: **Scopus**, **Chemical Abstracts Service** (CAS), **EBSCO Publishing**.

Международный редакционный совет

Богдан Н.А., первый заместитель начальника Госпромнадзора (Минск, Белоруссия)

Буй С.Н., д-р техн. наук, проф., проректор Ханойского университета горной промышленности и геологии (Ханой, Вьетнам)

Ван Вингерден К., д-р техн. наук, вице-президент компании Gexcon (Берген, Норвегия)

Джунушев Д.М., директор Государственной инспекции по экологической и технической безопасности при Правительстве Кыргызской Республики (Бишкек, Киргизия)

Заксенхофер Р., проф., Горный университет (Леобен, Австрия)

Котов С.Г., канд. техн. наук, доцент, ученый секретарь НПЦ Государственного комитета судебных экспертиз Республики Беларусь (Минск, Белоруссия)

Макажанов Н.К., канд. экон. наук, заместитель председателя Комитета индустриального развития и промышленной безопасности Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан (Астана, Казахстан)

Мельник В.В., руководитель управления государственного надзора за объектами котельных, газовых хозяйств и подземных сооружений Комитета индустриального развития и промышленной безопасности Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан (Астана, Казахстан)

Пан Ч., д-р юр. наук, проф., директор Центра исследования мировой нефтяной политики при Китайском университете нефти (Пекин, Китай)

Рафат Г., проф., директор компании R&K-Geoengineering Ltd (Дуйсбург, Германия)

Ростами Д., канд. техн. наук, доцент Департамента горного дела Колорадской горной школы; директор Института открытых разработок и механики недр (Голден, США)

Сафаров Р.С., канд. техн. наук, директор Азербайджанского государственного научно-исследовательского института по охране труда и технике безопасности МЧС (Баку, Азербайджан)

Шевчук В.Г., д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой общей и химической физики Одесского национального университета им. И.И. Мечникова (Одесса, Украина)

Юй Л., канд. техн. наук, научный сотрудник Китайского геологического университета (Пекин, Китай)

Редакционная коллегия

Агапов А.А., канд. техн. наук, директор расчетно-аналитического центра ЗАО НТЦ ПБ (Москва, Россия)

Божко Д.И., канд. техн. наук, зам. руководителя по работе с органами власти ООО «Термика» (Москва, Россия)

Горлов А.Н., начальник Управления государственного строительного надзора Ростехнадзора (Москва, Россия)

Гражданкин А.И., д-р техн. наук, зав. отделом системного анализа безопасности ЗАО НТЦ ПБ (Москва, Россия)

Ермак Г.П., канд. техн. наук, начальник Управления по надзору в угольной промышленности Ростехнадзора (Москва, Россия)

Иваницкая Е.В., канд. филол. наук, зам. главного редактора (Москва, Россия)

Кадушкин Ю.В., ген. директор ЗАО НПО «Техкранэнерго» (Владимир, Россия)

Кручинина И.А., д-р техн. наук, директор АНО АИПР (Москва, Россия)

Лисанов М.В., д-р техн. наук, канд. физ.-мат. наук, директор центра анализа риска ЗАО НТЦ ПБ (Москва, Россия)

Матвиенко Ю.Г., д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией ФГБУ науки Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН (Москва, Россия)

Нестеров Ю.Л., начальник Управления по надзору за объектами нефтегазового комплекса Ростехнадзора (Москва, Россия)

Низовцев А.В., ответственный секретарь редакции (Москва, Россия)

Пиляев Н.А., зам. главного редактора (Москва, Россия)

Селезнёв Г.М., и. о. начальника Управления общепромышленного надзора Ростехнадзора (Москва, Россия)

Филатов А.П., канд. техн. наук, начальник Управления горного надзора Ростехнадзора (Москва, Россия)

Чуркин Г.Ю., канд. техн. наук, зам. директора АНО АИПР (Москва, Россия)

Шалаев В.К., д-р техн. наук, директор по нормативно-правовому регулированию ЗАО НТЦ ПБ (Москва, Россия)

Яковлев Д.А., начальник Правового управления Ростехнадзора (Москва, Россия)

Компьютерная подготовка и верстка —

С.В. Косторнова

Подписано в печать 23.04.20

Формат 60x90 1/8

Бумага мелованная. Печать офсетная.

Тираж 1650 экз.

Зак. Р-02246-20

Цена 1500 руб.

Отпечатано в ООО «РПК «Зетапринт»

109383, РФ, г. Москва, ул. Шоссейная, д. 90, стр. 7

Тел. +7 (495) 775-23-38.

Редакция не несет ответственности за достоверность и точность приведенных фактов, экономико-статистических данных и прочих сведений, содержащихся в авторских публикациях. Редакция может публиковать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка материалов, опубликованных в журнале «Безопасность труда в промышленности», только с разрешения редакции.

Материалы, представленные в редакцию, авторам не возвращаются.

За содержание рекламы ответственность несет рекламодатель.

На 1-й с. обл.: памятник-ансамбль «Героям Сталинградской битвы» на Мамаевом кургане в Волгограде

СОДЕРЖАНИЕ



Наука и техника	7
Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Шпаков И.И., Гончаров В.В.	7
Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства	
Бордаков В.Н.	17
Параметрическое обоснование оснащения объекта огнетушителями	
Проблемы, суждения	29
Черданцев С.В., Шлапаков П.А., Лебедев К.С., Колыхалов В.В.	29
Особенности формирования ударного фронта на участках поворотов горных выработок	
Агапов А.А., Сафонов В.С., Сумской С.И., Швыряев А.А.	36
О некоторых различиях в методических подходах при моделировании параметров волн давления от сгорания и детонации облаков топливно-воздушных смесей	
Минько В.М., Басараб А.	43
О проблеме учета несчастных случаев и о снижении травмоопасности в строительстве	
Панфилов А.В., Дерюшев В.В., Короткий А.А.	48
Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода	
Обеспечение безопасности	56
Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И., Назаров А.А.	56
К вопросу о пожарной опасности аккумуляторных батарей	
Обмен опытом	64
Матюшин А.В., Фирсов А.Г., Матюшин Ю.А., Гончаренко В.С.	64
Методология распределения объектов защиты по категориям риска причинения вреда (ущерба) объектам защиты в результате пожара	
Тарарычкин И.А.	73
Стойкость трубопроводных систем к повреждениям в условиях ремонта и реконструкции	
Анализ риска	79
Жуков И.С., Лисанов М.В., Самусева Е.А.	79
Критерии допустимого социального риска при авариях на опасных производственных объектах	
Васильев Г.Г., Леонович И.А., Левин С.Н., Писаревский В.М.	87
Потенциальные риски потерь нефтепродуктов при хранении и анализ путей их снижения	
К 75-летию Великой Победы	94

Occupational Safety in Industry

№ 5 • 2020

Founders



The Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service (ROSTECHNADZOR)



Closed Joint Stock Company «Scientific Technical Center of Industrial Safety Problems Research» (STC «Industrial Safety» CJSC)

Publisher

STC «Industrial Safety» CJSC, Block 14, Perevedenovsky Pereulok 13, P.O.B. 38, 105082, Moscow
Tel.: +7 (495) 620-47-47; Fax: +7 (495) 620-47-46
ntc@safety.ru www.safety.ru

Editorial staff

Block 14, Perevedenovsky Pereulok 13, P.O.B. 38, 105082, Moscow
Telefax: +7 (495) 620-47-44;
btp@safety.ru, redbtp@safety.ru; www.btpnadzor.ru
Advertising department — Ignatova K.M., ignatova@safety.ru.
Tel. +7 (495) 620-47-54

The journal is included into the List of the leading reviewed scientific journals and editions, in which the main scientific results of theses on a competition of academic degrees of the candidate and doctor of science shall be published. The List is formed by the State Commission for Academic Degrees and Titles of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

The journal is amongst the Russian journals indexed in the Russian index of the scientific citation (two-year impact-factor of RINTs without self-citation — 0,338, a five-year impact-factor of RINTs without self-citation — 0,303, ten-year Hirsch index — 20), in the international databases: Scopus, Chemical Abstracts Service (CAS), EBSCO Publishing.

Computer-aided preparation and makeup — S.V. Kostornova
Signed for printing 23.04.20
Format 60x90 1/8
Enameled stock. Indirect printing
Circulation 1650 copies. Order P-02246-20
Price — 1500 RUB
Printed in OOO RPK Zetaprint
Shosseynaya 90, build. 7, 109383, Moscow, Russian Federation
Tel. +7 (495) 775-23-38.

Editorial board

Aleshin A.V., Candidate of Legal Sciences, Head of Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

Buinovsky S.N., Doctor of Technical Sciences, Editor-in-chief of the Journal (Moscow, Russia)

Golik V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, FGBOU VPO «North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University)» (Vladikavkaz, Russia)

Grachev V.A., RAS Corresponding Member, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chairman of Public Council at Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

Grigoryev M.N., Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, RANS Academician, Director of OOO «Gekon» (Saint Petersburg, Russia)

Dmitrievsky A.N., RAS Academician, Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Director of Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences (RAS) (Moscow, Russia)

Egorov M.P., RAS Academician, Doctor of Chemical Sciences, Director of the Institute of Organic Chemistry Named after N.D. Zelinsky of RAS (Moscow, Russia)

Klovach E.V., Doctor of Technical Sciences, Professor, General Director, STC «Industrial Safety» CJSC (Moscow, Russia)

Kluev V.V., RAS Academician, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorary Member of RONKTD (Moscow, Russia)

Krasnykh B.A., Candidate of Technical Sciences, Chairman of the Scientific and Technical Council of Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

Malyshev Yu.N., RAS Academician, Doctor of Technical Sciences, Professor, Honorable PRESIDENT of NP «Mining Operators of Russia» (Moscow, Russia)

Makhtov N.A., RAS Corresponding Member, Doctor of Technical Sciences, Professor, FSBI of Science Institute of Engineering in the Name of A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Pecherkin A.S., Doctor of Technical Sciences, Professor, First Deputy General Director, STC «Industrial Safety» CJSC (Moscow, Russia)

Sidorov V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, President of Fund of James Bruce (Moscow, Russia)

Trembitsky A.V., Deputy of Rostekhnadzor Head (Moscow, Russia)

Trubetskoi K.N., RAS Academician, Doctor of Technical Sciences, Professor, Counsellor of RAS Presidium (Moscow, Russia)

Ferapontov A.V., Candidate of Technical Sciences, Deputy of Rostekhnadzor Head (Moscow, Russia)

Frolov D.I., Candidate of Economic Sciences, Deputy of Rostekhnadzor Head (Moscow, Russia)

Shmal G.I., Candidate of Economic Sciences, President of the Union of Oil and Gas Producers of Russia (Moscow, Russia)

International editorial board

Bogdan N.A., First Deputy Head of Gospromnadzor (Minsk, Belarus)

Bui Xuan Nam, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice Rector, Hanoi University of Mining and Geology (Hanoi, Vietnam)

Van Wingerden K., Doctor of Technical Sciences, Senior Vice President, Gexcon (Bergen, Norway)

Junushev J.M., Director of the State Inspection on the Environmental and Technical Safety Affiliated to the Government of Kyrgyz Republic (Bishkek, Kirghizia)

Sachsenhofer R., Professor, National Mineral Resources University (Leoben, Austria)

Kotov S.G., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Academic Secretary of SPC of the State Forensic Examination Committee of the Republic of Belarus (Minsk, Belarus)

Makazhanov N.K., Candidate of Economic Sciences, Vice-chairman of the Committee of Industrial Development and Industrial Safety of the Ministry for Investments and Development of the Republic of Kazakhstan (Astana, Kazakhstan)

Melnik V.V., Head of the Department of State Supervision for Boiler, Gas and Lifting Facilities of the Committee of Industrial Development and Industrial Safety of the Ministry for Investments and Development of the Republic of Kazakhstan (Astana, Kazakhstan)

Pang Chang Wei, Doctor of Legal Sciences, Professor, Director of the World Oil Policy Research Center at China University of Petroleum (Beijing, China)

Rafat G., Professor, Company Director, R&K-Geoengineering Ltd (Duisburg, Germany)

Rostami J., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Mining Engineering of Colorado School of Mines; Director of Excavation Engineering and Earth Mechanics Institute (Golden, USA)

Safarov R.S., Candidate of Technical Sciences, Director of Azerbaidjan State Scientific and Research Institute for Occupational Safety and Health and EMERCOM (Baku, Azerbaijan)

Shevchuk V.G., Doctor of Physics and Mathematical Sciences, Professor, Department Head of General and Chemical Physics of Odessa National University Named after I.I. Mechnikov (Odessa, Ukraine)

Yu Lijiang, Candidate of Technical Sciences, Research Assistant of China University of Geosciences (Beijing, China)

Editorial staff

Agapov A.A., Candidate of Technical Sciences, Director of Computational & Analytical Center, STC «Industrial Safety» CJSC (Moscow, Russia)

Bozhko D.I., Candidate of Technical Sciences, Deputy Head on Work with Authorities, OOO Termika (Moscow, Russia)

Gorlov A.N., Head of Department, State Construction Supervision of Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

Grazhdankin A.I., Doctor of Technical Sciences, Deputy Head of Safety Analysis Sistem, STC «Industrial Safety» CJSC (Moscow, Russia)

Ermak G.P., Candidate of Technical Sciences, Head of Department on Supervision in Coal Industry of Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

Ivanitskaya E.V., Candidate of Philological Sciences, Deputy Editor-in-chief (Moscow, Russia)

Kadushkin Yu.V., General Director of ZAO NPO «Tekhkranenergo» (Vladimir, Russia)

Kruchinina I.A., Doctor of Technical Sciences, Director, ANO «Industrial Risk Research Agency» (Moscow, Russia)

Lisanov M.V., Doctor of Technical Sciences, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Director of Risk Analysis Center, STC «Industrial Safety» CJSC (Moscow, Russia)

Matvienko Yu.G., Doctor of Technical Sciences, Professor, Laboratory Head of FGBU of Science of Institute of Engineering in the Name of A.A. Blagonravov of the Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)

Nesterov Yu.L., Head of Department on Supervision for Oil and Gas Complex Facilities of Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

Nizovtsev A.V., Responsible Secretary of the Editorial Staff (Moscow, Russia)

Pilyaev N.A., Deputy Editor-in-chief (Moscow, Russia)

Seleznev G.M., Acting Head of General Purpose Industrial Supervision Department of Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

Filatov A.P., Candidate of Technical Sciences, Head of Department of Mining Supervision of Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

Churkin G.Yu., Candidate of Technical Sciences, Deputy Director, ANO «Industrial Risk Research Agency» (Moscow, Russia)

Shalaev V.K., Doctor of Technical Sciences, Director for Regulatory Documents of STC «Industrial Safety» CJSC (Moscow, Russia)

Yakovlev D.A., Head of Legal Department of Rostekhnadzor (Moscow, Russia)

CONTENT



Science and Technology	7
Volokhovskiy V.Yu., Vorontsov A.N., Shpakov I.I., Goncharov V.V.	7
Analysis of the Operational Reliability of the Hot-Metal Crane Cargo Ropes in Steelmaking	
Bordakov V.N.	17
Parametric Justification for Equipping the Object with Fire Extinguishers	
Views and Opinions	29
Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Lebedev K.S., Kolykhalov V.V.	29
Specifics of the Shock Front Formation at the Sections of Turns of the Mine Workings	
Agapov A.A., Safonov V.S., Sumskey S.I., Shvyryaev A.A.	36
On Some Differences in the Methodological Approaches when Modeling the Parameters of Pressure Waves from Combustion and Detonation of Fuel-Air Mixtures Clouds	
Minko V.M., Basarab A.	43
On the Problem of Work Injuries Record and on Reduction of Injury Hazard Risk in Construction	
Panfilov A.V., Deryushev V.V., Korotkiy A.A.	48
Recommended Safety Systems for Risk-Oriented Approach	
Safety Issues	56
Smelkov G.I., Pekhotikov V.A., Ryabikov A.I., Nazarov A.A.	56
To the Issue of Accumulator Batteries Fire Safety	
Experience Sharing	64
Matyushin A.V., Firsov A.G., Matyushin Yu.A., Goncharenko V.S.	64
Methodology for the Distribution of Objects of Protection by Categories of Risk Causing Harm (Damage) to the Objects of Protection in Case of Fire	
Tararychkin I.A.	73
Pipeline Systems Resistance to Damages under the Conditions of Repair and Reconstruction	
Risk Analysis	79
Zhukov I.S., Lisanov M.V., Samuseva E.A.	79
Criteria for Tolerable Social Risk in case of Accidents at Hazardous Production Facilities	
Vasilyev G.G., Leonovich I.A., Levin S.N., Pisarevskiy V.M.	87
Potential Risks of Oil Product Losses during Storage and Analysis of Ways for Reducing Them	
To the 75th Anniversary of the Great Victory	94

Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства



В.Ю. Волоховский,
канд. техн. наук, доцент,
руководитель группы,
volokhovskiy@intron.ru



А.Н. Воронцов,
канд. техн. наук, доцент,
вед. сотрудник



И.И. Шпаков,
руководитель
группы



В.В. Гончаров,
руководитель
службы

ООО «ИНТРОН ПЛЮС», Москва, Россия

ПАО «Северсталь», Череповец,
Россия

При выполнении технологических операций заливки чугуна в конвертер стальные канаты мостовых заливочных кранов в цехах сталеплавильного производства подвергаются циклическому силовому и высокоинтенсивному тепловому нагружению. В статье отражены результаты лабораторных экспериментов и натурных испытаний по изучению влияния эксплуатационных факторов на работоспособность канатов грузового подъема заливочных кранов в условиях цеха выплавки конвертерной стали ПАО «Северсталь». Обсуждается практика применения магнитного метода неразрушающего контроля для диагностирования стальных канатов. Приведены рекомендации по организации мониторинга, коррекции предельного значения допустимой потери сечения по металлу и продлению нормативного ресурса грузовых канатов механизмов главного подъема заливочных кранов.

Ключевые слова: заливочные краны, стальные канаты, магнитная дефектоскопия, регламент контроля, эксплуатационный дефект, нормативный ресурс.

Для цитирования: Волоховский В.Ю., Воронцов А.Н., Шпаков И.И., Гончаров В.В. Анализ эксплуатационной надежности грузовых канатов заливочных кранов сталеплавильного производства // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 7–16. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-7-16

Введение

Грузовые канаты главного подъема заливочных кранов конвертерных цехов металлургических заводов работают в тяжелых эксплуатационных условиях. Канаты подвергаются воздействию высоких температур вследствие теплового излучения транспортируемого в ковше жидкого чугуна, а также выбросов пламени при его заливке в конвертер (рис. 1). В случае нарушения технологии процесса заливки или инструкций по подготовке металлолома к плавке температура наружных проволок может достигать 200–400 °С и более, что ведет к ускоренной деградации несущей способности каната.

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности [1] не содержат прямых указаний относительно предельных температур, до которых разрешен нагрев стальных канатов. Един-

ственным документом Ростехнадзора, в котором приведены ограничения по верхнему пределу температуры эксплуатации стальных канатов, является РД 10-231–98 [2]. В п. 2.1.9 [2] введены ограничения на нагрузочную способность стропов из стальных канатов с металлическим сердечником. В международном стандарте ISO 4309:2017(E) [3] также не отражены ограничения по температуре стальных канатов в процессе эксплуатации. Как в отечественных, так и в зарубежных нормативно-технических документах отсутствуют количественные ограничения на изменение прочностных характеристик стальных канатов в зависимости от характера и уровня эксплуатационных термовоздействий. Поэтому производители канатов рекомендуют не применять на грузовых кранах стальные проволочные канаты из углеродистой стали при рабочих температурах выше 450 °С [4, 5].



▲ Рис. 1. Заливка жидкого чугуна в конвертер
▲ Fig. 1. Pouring-in of molten iron into the converter

Обычный режим работы крана включает 25–30 заливок в сутки при средней продолжительности высокотемпературного воздействия на канат около 3 мин. Циклический характер грузовых и термических нагрузок на канаты приводит к изменению механических свойств материала проволок и ускоренному снижению несущей способности каната. Иногда случаются и аварийные ситуации вследствие обрывов канатов заливочных кранов [6]. Поэтому периодический мониторинг технического состояния (ТС) грузовых канатов средствами неразрушающего контроля (НК) является важнейшей составляющей мероприятий, которые персонал сталеплавильных цехов проводит в целях обеспечения надежности и безопасности работы заливочных кранов. Практика показывает, что наиболее распространенный эксплуатационный дефект грузовых канатов заливочных кранов в конвертерных цехах — это потеря сечения (ПС) по металлу из-за коррозионного, абразивного и фрикционного износов проволок. Локальные дефекты (ЛД) типа обрывов проволок и (или) прядей канатов встречаются крайне редко. Эффективным инструментальным средством НК стальных канатов и диагностирования как наружных, так и внутренних дефектов типа ПС и ЛД являются дефектоскопы, реализующие метод регистрации магнитных полей рассеяния, возникающих вблизи нарушений однородности намагниченного каната из ферромагнитной стали.

Порядок мониторинга и нормы браковки канатов заливочных кранов цеха выплавки конвертер-

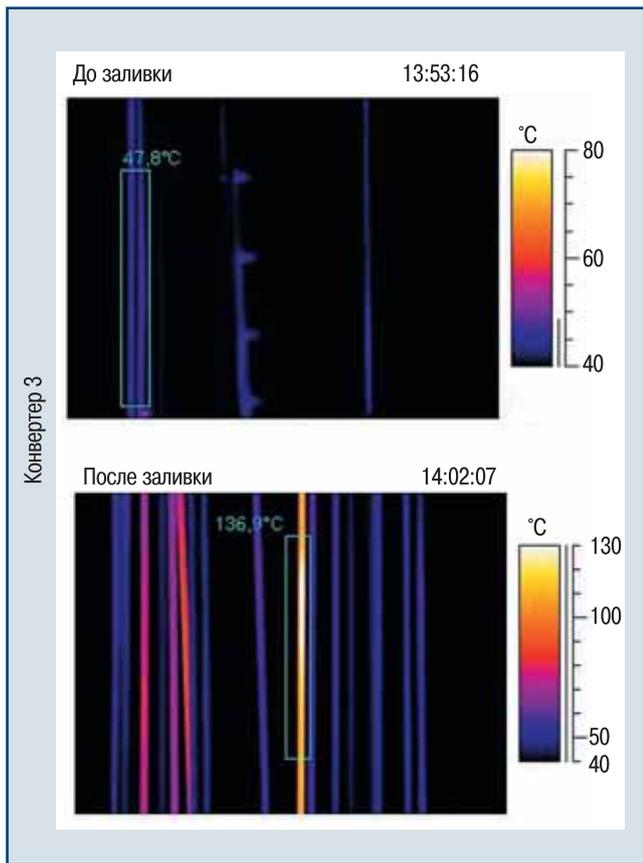
ной стали (ЦВКС) ПАО «Северсталь» определяются внутренним документом «Регламент осмотра и выбраковки грузовых канатов механизмов главного подъема заливочных кранов» (далее — Регламент), утвержденным 02.07.2009.

Для контроля ТС грузовых канатов трех заливочных кранов в ЦВКС более 15 лет используют магнитные дефектоскопы «ИНТРОС» [7, 8]. Канаты диагностируют специалисты сервисной службы (ООО «Промсервис»). Периодичность дефектоскопии составляет 50–60 заливок (плавов). Результаты контроля износа грузовых канатов заливочных кранов с применением дефектоскопа «ИНТРОС» в условиях ЦВКС приведены в [9, 10].

В марте 2017 г. в ЦВКС на одном из кранов для опытной эксплуатации был стационарно установлен автоматизированный магнитный дефектоскоп «ИНТРОС-АВТО» [11, 12], в котором идентификация дефектов, определение их числа и параметров, а также анализ текущего ТС контролируемого объекта на соответствие критериям годности по диагностическим параметрам ПС и ЛД, выполняются автоматически. Машинист крана без привлечения дефектоскопистов (специалистов по магнитному НК) обслуживает дефектоскоп и проводит диагностирование канатов. При работе на панели блока управления и идентификации (БУИ) дефектоскопа загораются сигналы «светофора». Зеленый сигнал означает работоспособное состояние каната; желтый — ограниченно работоспособное, требующее повышенного внимания; красный — неработоспособное. Автоматизация процесса диагностирования путем передачи части функций дефектоскописта аппаратуре НК имеет большое значение для повышения эффективности работ. За счет исключения субъективного фактора при расшифровке дефектограмм, идентификации дефектов и определении их параметров человеком повышается достоверность результатов диагностирования. В последние два–три года в ЦВКС модернизированы системы отсоса неорганизованных выбросов горячих потоков воздуха в конвертерной зоне, что позволило снизить вероятность нагрева грузовых канатов при заливке чугуна до опасно высоких температур: 250–300 °С. С октября 2017 г. на заливочных кранах ЦВКС вместо шестипрядных канатов диаметром 42 мм, изготавливаемых по ТУ 14-4-273—2002 (конструкция 6x25(1+6; 6+12)+7x7(1+6), применяют канаты стандарта EN 12385-4—2000 (конструкция 6xK31(1+6+6/6+12)+7x7(1+6) того же диаметра с пластическим обжатием прядей и проволоками из стали марки 70KK (маркировочная группа 1770 Н/мм² по DIN 2078). Эти два обстоятельства повысили надежность работы канатов и открыли возможность продления их нормативного ресурса. В 2018–2019 гг. реализована программа исследований влияния циклических силовых и температурных воздействий на механические характеристики и несущую способность канатов стандарта EN 12385-4—2000.

Пирометрия и лабораторный анализ температурного воздействия на канаты

Измерения температуры канатов и узлов механизма главного подъема заливочных кранов, проведенные в период одной рабочей смены, показали следующее. Грузовые канаты во время спуска пустого ковша после заливки чугуна нагревались до 128–160 °С. Термограммы, полученные для одного из кранов, приведены на рис. 2. Максимальные температуры траверсы и цепей тепловой защиты были равны соответственно 193,5 и 222,6 °С; средняя температура чугуна (шлака) в ковше — 998,5 °С. Полученные данные послужили основанием для разработки и реализации программы исследований влияния термических воздействий на физико-механические характеристики материала проволоки и несущую способность канатов.



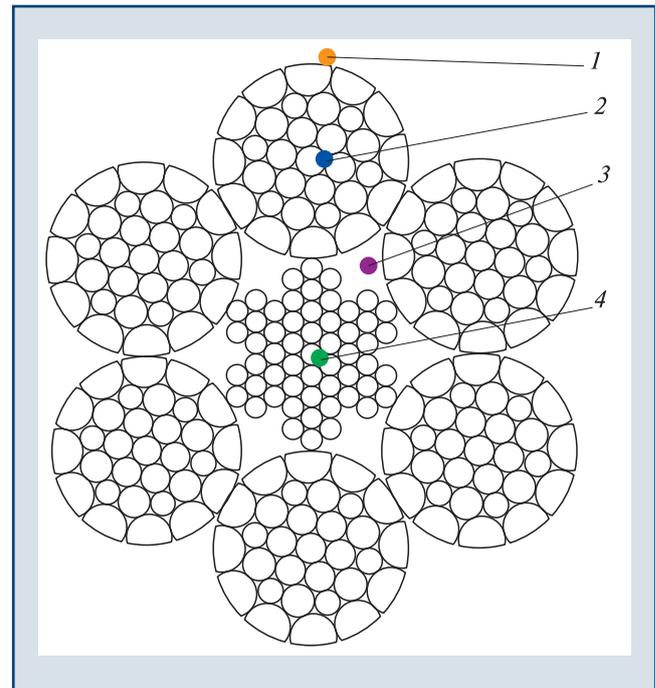
▲ Рис. 2. Термограммы грузовых канатов заливочного крана

▲ Fig. 2. Thermograms of the filling crane cargo ropes

Температурный градиент по сечению каната в начале заливки вызывает появление дополнительных термических напряжений в проволоках прядей и сердечника, отрицательно влияющих на несущую способность (прочность) каната. Оценка температурных напряжений с учетом снижения прочностных характеристик проволоки при термоциклировании позволяет выявить возможный характер разрушения структуры каната и сформулировать условия прочно-

сти каната в горячем состоянии [9]. В лабораторных условиях исследовано распределение температуры по сечению каната при кратковременном нагреве, имитирующем термическое воздействие в процессе заливки чугуна из ковша в конвертер.

На рис. 3 показано расположение термодпар в поперечном сечении на середине длины образца каната длиной 35 см (здесь 1–4 — термодпары). Цветовое обозначение термодпары соответствует цвету линии, отображающей на термограммах измеренные значения температуры, зафиксированные данной термодпарой.

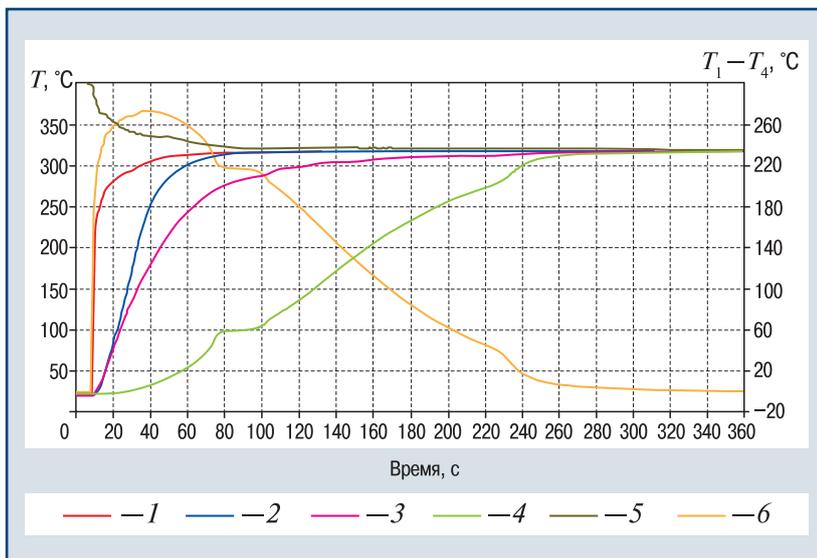


▲ Рис. 3. Размещение термодпар в сечении каната стандарта EN 12385-4–2000

▲ Fig. 3. Placement of thermocouples in the cross section of the rope of standard EN 12385-4–2000

На рис. 4 приведены результаты эксперимента при опускании образцов в тигель с расплавленным свинцом (начальная точка плавления — $T = 327\text{ °C}$). Кривые 1–4 соответствуют температурам, измеряемым термодпарами соответственно № 1–4; кривая 5 — температура среды (расплавленный свинец); кривая 6 — разность температур $T_1 - T_4$, °С, измеряемых термодпарами № 1 и 4. Масштаб разности температур $T_1 - T_4$ виден на правой шкале.

Значительный температурный градиент $T_1 - T_4$ (кривая 6) держится на протяжении примерно 3 мин, что соответствует средней продолжительности температурного воздействия на канат в начальной стадии заливки чугуна. Разница температур наружных и внутренних проволок сердечника может достигать нескольких сотен градусов, что приводит к появлению температурных напряжений 500–600 МПа [13]. При температуре около 300 °С прочность по напряжениям «горячего» каната в целом снижается



▲ Рис. 4. Изменение температуры по сечению образца каната стандарта EN 12385-4-2000 при погружении в расплавленный свинец
 ▲ Fig. 4. Change in temperature over the cross-section of the rope sample of standard EN 12385-4-2000 when immersed in the molten lead

примерно на 25 % по сравнению с прочностью «холодного» (остывшего) каната [14, 15]. Заметим, что в производственных условиях измерение температуры поверхности грузовых канатов тепловизионными средствами с приемлемой точностью (10–20 °С) возможно лишь в условиях отсутствия факела пламени над конвертером и существенных неоднородностей поля температур вблизи канатов.

Для оценки влияния высокотемпературного нагрева и термоциклирования на микроструктуру, микротвердость и механические свойства материала проволок каната стандарта EN 12385-4-2000 выполнен комплекс металлографических исследований [14]. Эксперименты проводились с использованием двух образцов: отрезка каната в исходном состоянии и каната после демонтажа с крана с наработкой $N = 1189$ заливок. Первый образец каната отрезали перед навеской на кран от той же бухты, второй — вырезали из наиболее поврежденного участка демонтированного каната с максимальной величиной ПС = 3 %. Результаты эксперимента по определению микротвердости (HV0,1) свидетельствуют о том, что у каната после эксплуатации на кране снижается микротвердость металла проволок наружных прядей. Основная задача состояла в выявлении температурного интервала синеломкости стали марки 70КК и количественной оценке повышения предела

прочности и снижения пластичности. Испытания на разрыв в горячем состоянии проводили на проволоках диаметром 1,65 мм, отобранных из наружной пряди каната. Установлено, что при температуре нагрева $T = 240$ °С эффект синеломкости стали марки 70КК проявляется в наибольшей мере.

Результаты разрывных испытаний образцов отработавших канатов

Действующим в ПАО «Северсталь» внутренним Регламентом определены два критерия, по которым эти канаты должны быть сняты с эксплуатации на основании данных диагностирования ТС с использованием магнитного дефектоскопа «ИНТРОС». Первое условие — превышение сигналом по каналу ПС нормативного значения (ПС* = 6 %). Второе — достижение предельной наработки ($N^* = 1200$ заливок чугуна в конвертер).

Возникает вопрос, какова при достижении этих норм браковки остаточная несущая способность каната, который эксплуатировали в условиях ЦВКС при значительных циклических термомеханических нагрузках? В целях получения ответа на этот вопрос проведены разрывные испытания образцов канатов стандарта EN 12385-4-2000, демонтированных с кранов в соответствии с требованиями Регламента.

В лаборатории ООО «Северсталь подъемные технологии» на разрывной машине выполнены испытания на агрегатную прочность образцов, вырезанных из наиболее нагруженных и поврежденных участков канатов, которые эксплуатировались в ЦВКС на кранах № 8, 10 и были демонтированы после достижения наработок, близких к $N^* = 1200$ заливок. Результаты разрывных испытаний на агрегатную прочность образцов № 1 и 2 приведены в табл. 1. Анализ данных свидетельствует о том, что демонтированные канаты обладали достаточным коэффициентом запаса прочности по отношению к номинальному натяжению каната при весе полного ковша более 740 кН.

Результаты определения суммарных разрывных усилий (согласно ГОСТ 3241-97) по проволокам образцов, которые вырезались из демонтированных канатов с наработкой, близкой к предельной, при-

Таблица 1

Номер образца	Номер каната	Номер крана	ПС, %	Минимальное расчетное разрывное усилие по сертификату каната, кН	Фактическое разрывное усилие каната после эксплуатации, кН	Изменение по отношению к минимальному разрывному усилию по сертификату каната, %	Кoeffициент запаса прочности
1	1358018000	8	3	1245	1306,04	4,9	7,50
2	1359219001	10	3	1245	1246,08	0,1	7,16

Таблица 2

Номер каната	Номер крана	Число заливок	ПС, %	Суммарное разрывное усилие проволок в канате, кН		Изменение по отношению к суммарной прочности проволок по сертификату, %	Коэффициент запаса прочности
				по сертификату	после эксплуатации		
1359218000	8	1200	2,5	1632,7	1635,90	1,30	7,80
			0,5		1679,49	2,87	8,01
1359219001	10	1200	3,0	1626,2	1498,60	-7,85	7,16
			0		1692,60	4,08	8,07
1360639000	10	1168	3,0	1622,0	1523,81	-6,05	7,27
			1,1		1586,62	-2,18	7,57
1362433000	8	1200	2,5	1619,4	1699,65	4,96	8,11
			1,5		1652,07	2,02	7,88
1363957000	8a	1190	3,0	1638,3	1685,76	2,90	8,04
			0,4		1631,16	-0,44	7,78
1362433001	№ 8	863	2,3	1617,8	1635,75	1,11	7,80
			1,5		1673,15	3,42	7,98
			0,5		1647,50	1,83	7,86
1363957001	10	1065	2,5	1645,3	1702,36	3,47	8,12
			1,5		1712,21	4,07	8,17
			0,5		1619,08	-1,59	7,72
1362574001	8a	1157	2,5	1632,9	1705,51	4,45	8,14
			0,7		1665,51	2,00	7,94

введены в табл. 2. Коэффициент запаса прочности определялся для разрывных усилий «в целом», которые меньше на 17 % суммарного разрывного усилия проволок за счет винтовой конструкции каната [16].

Анализ показал, что у выбракованных канатов наблюдается как уменьшение, так и увеличение суммарного разрывного усилия проволок. Так, например, среднее значение изменения прочности канатов с наработкой, близкой к нормативной ($N^* = 1200$ заливок), и диагностическим показателем ПС = 3 % составляет минус 3,67 %. Помимо естественного разброса результатов испытаний, изменение прочности проволок отработавших канатов объясняется рядом дополнительных факторов. Прежде всего это влияние термомеханических воздействий, испытываемых канатами, на свойства и механические характеристики стали марки 70КК. Кроме того, следует иметь в виду, что температура наружных проволок канатов в процессе заливки чугуна контролируется лишь эпизодически. Поэтому неизвестно, до каких температур нагревались наиболее изношенные участки грузовых канатов, из которых вырезали образцы для разрывных испытаний. К тому же при определенных температурах нагрева у проволок каната из углеродистой стали наблюдается явление синеломкости, которое выражается в повышении твердости и снижении пластичности материала, что весьма опасно при циклическом изменении нагрузки [14].

По результатам выполненных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Температуру наружных проволок желательно непрерывно измерять в течение нескольких технологических циклов заливки чугуна в конвертер.

2. Грузовые канаты, демонтированные в соответствии с требованиями Регламента, имели коэффициенты запаса как по агрегатной прочности, так и по прочности проволок «в целом» больше, чем минимальный «коэффициент использования канатов» для механизмов группы классификации М7, равный 7,1 [1]. Данный факт свидетельствует о том, что предельные значения диагностического параметра ПС* = 6 % и нормативной наработки $N^* = 1200$ заливок могут быть пересмотрены в сторону их увеличения.

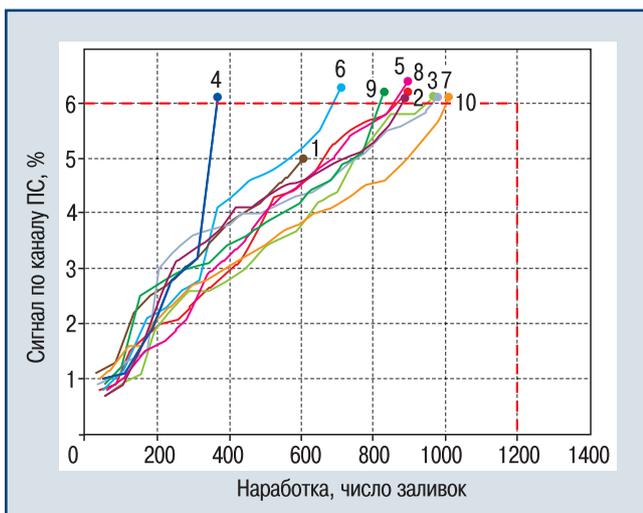
Анализ работоспособности канатов по результатам диагностирования

Под работоспособностью каната понимается состояние, при котором значения параметров, характеризующих его способность выдерживать заданные термомеханические нагрузки, соответствуют требованиям нормативно-технической документации. Для канатов заливочных кранов такими параметрами являются максимальное рабочее натяжение, температура среды в процессе заливки, наработка и диагностический показатель износа — значение ПС. Нарботка определяется числом заливок чугуна в конвертер (числом плавов). С точки зрения температурного воздействия на канат наработку также естественно измерять числом термоциклов.

Индивидуальным ресурсом конкретного каната является наработка с момента навески до замены по достижении предельного значения N^* или, согласно нормам браковки, по эксплуатационным дефектам. Обобщенным показателем ТС эксплуатируемого каната как механической конструкции служит коэффициент запаса прочности по нагрузке в «горячем» состоянии. В работе [9] предложена методика

расчетной оценки остаточной прочности канатов заливочных кранов по данным магнитной дефектоскопии с учетом влияния перечисленных выше термомеханических факторов.

Сравним влияние эксплуатационных режимов на работоспособность грузовых канатов, которые изготовлены по ТУ 14-4-273—2002 и стандарту EN 12385-4—2000. В качестве исходного материала для статистической обработки данных дефектоскопии используем так называемые таблицы стойкости — зависимости сигналов дефектоскопов «ИНТРОС» и «ИНТРОС-АВТО» по каналам ПС от наработки каната. В качестве примера на рис. 5 приведены результаты мониторинга ТС грузовых канатов ТУ 14-4-273—2002 одного из кранов (№ 10), полученные в период с декабря 2015 г. по декабрь 2016 г. до внедрения системы управления отсосом выбросов горячих потоков воздуха над конвертерами. Красные пунктирные линии ограничивают область работоспособных состояний канатов — $N^* = 1200$ заливок, $ПС^* = 6\%$. Нумерация кривых здесь и далее соответствует последовательной замене канатов вследствие отбраковки. Если не учитывать несколько выпадающих точек (редкие события), общим признаком браковки всех канатов является выход диагностического показателя ПС за предельный уровень $ПС^* = 6\%$ до достижения регламентируемого значения наработки $N^* = 1200$ заливок. Очевидно, причиной преждевременной замены канатов послужило интенсивное термическое воздействие при заливке чугуна, которое, наряду с термомеханическими напряжениями в проволоках, приводило к постепенному изменению начальной структуры металла, т.е. вызывало так называемый пережог каната.

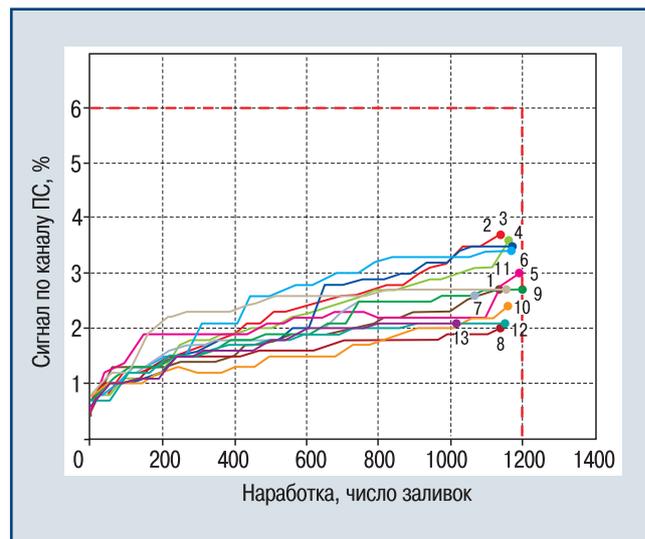


▲ Рис. 5. Зависимости сигнала по каналу ПС от наработки
▲ Fig. 5. Dependence of the signal on the Loss of Metallic Area channel on the operating time

В 2017 г. за счет принятия мер по снижению интенсивности температурного воздействия в процессе

заливки работоспособность используемых канатов, изготовленных по ТУ 14-4-273—2002, заметно повысилась. При наработках на всех трех кранах, близких к 1200 заливкам, лишь у двух демонтированных канатов максимальный показатель ПС был близок к предельному значению $ПС^* = 6\%$, остальные 16 канатов заменены со средними показателями $ПС = (4-4,6)\%$.

На рис. 6 показаны диагностические зависимости канатов новой конструкции EN 12385-4—2000, проработавших на кране № 10 с октября 2017 г. по октябрь 2019 г. в щадящих температурных условиях. Численные оценки показателей работоспособности канатов в период 2017—2019 гг. для трех кранов приведены в табл. 3. Все канаты сняты с эксплуатации вблизи планового показателя 1200 плавков со средними значениями ресурса 1136 (кран № 8), 1146 (кран № 8а) и 1142 (кран № 10) заливок. При этом средние значения ПС оказались меньше, чем аналогичные средние для канатов ТУ 14-4-273—2002 при близких выборках. К тому же распределения показателя ПС на канатах EN 12385-4—2000 всех кранов являются более компактными по сравнению с соответствующими распределениями у канатов ТУ 14-4-273—2002. Таким образом, канаты EN 12385-4—2000 имеют более стабильные термомеханические характеристики в сходных эксплуатационных условиях, а значит, открывается объективная возможность продления их ресурса по отношению к предельно допустимому значению ПС, равному 6% или даже несколько большему.



▲ Рис. 6. Зависимости сигнала по каналу ПС от наработки (щадящие температурные условия)
▲ Fig. 6. Dependence of the signal on Loss of Metallic Area channel on the operating time (gentle temperature conditions)

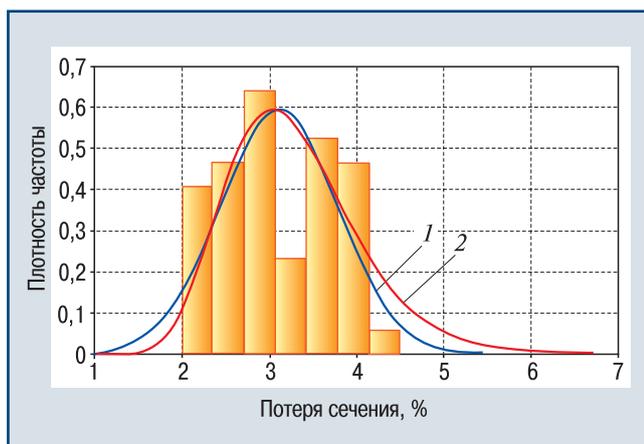
Расчет показателей риска

Наиболее частая причина демонтажа грузовых канатов на разных кранах — достижение наработкой значения, близкого к установленному Регламентом $N^* = 1200$ заливок. Измеренное значение ПС при замене

Таблица 3

Параметры наработки	Кран № 8	Кран № 8а	Кран № 10
	Период диагностирования		
	21.10.2017–16.11.2019	20.09.2017–28.10.2019	18.10.2017–20.10.2019
Число замен канатов (объем выборки)	17	18	13
Индивидуальный ресурс (число заливок):			
максимальный	1200	1200	1200
минимальный	936	1097	1017
средний	1136	1146	1142
стандартное отклонение	62	28	49
Потеря сечения при замене каната, %			
максимальная	4,50	4,00	3,70
минимальная	2,00	2,00	2,00
средняя	3,28	3,19	2,81
стандартное отклонение	0,64	0,71	0,59

каната является случайной величиной. За показатель риска аварийного ТС каната можно принять статистическую вероятность случайного события, которое заключается в выходе диагностического показателя ПС за браковочный уровень $ПС^* = 6\%$ при наработке $N^* = 1200$ заливок (термоциклов). Гистограмма измеренных значений ПС при заменах канатов на трех кранах и ее аппроксимации нормальным и логарифмически нормальным законами распределения приведены на рис. 7 (здесь 1 — нормальное распределение; 2 — логарифмически нормальное распределение). Логарифмически нормальное распределение присуще ресурсу объектов по числу циклов нагружения до разрушения [17, 18]. По сути, это близко к характеру работы канатов заливочных кранов при периодических силовых и температурных воздействиях.



▲ Рис. 7. Гистограмма диагностического параметра ПС при заменах канатов и ее аппроксимации
 ▲ Fig. 7. Histogram of the Loss of Metallic Area diagnostic parameter when replacing the ropes and its approximation

Функция безопасности $S(N)$ вводится как вероятность $P\{A\}$ случайного события А, состоящего в том, что при $N = N^*$ ни разу не возникнет «аварийная» ситуация (отказ — превышение диагностическим параметром ПС порогового значения), т.е.

$$S(N^*) = P\{ПС(N^*) \leq ПС^* = 6\%\}.$$

Тогда функция $Q(N^*) = 1 - S(N^*)$ определяет искомую вероятность (риск) превышения допустимого норматива ПС* по достижении наработки N^* . В данном случае получены следующие оценки:

в предположении нормального распределения:

$$P\{1 < ПС \leq ПС^*\} = 0,999199;$$

$$Q(N^*) = P\{ПС > ПС^*\} = 8,01144 \cdot 10^{-4};$$

в предположении логарифмически нормального распределения:

$$P\{1 < ПС \leq ПС^*\} = 0,998673;$$

$$Q(N^*) = P\{ПС > ПС^*\} = 13,2697 \cdot 10^{-4}.$$

При мониторинге грузовых канатов с применением дефектоскопа «ИНТРОС-АВТО», когда контрольными показателями диагностирования являются сигналы на дисплее БУИ (желтый, соответствующий ПС = 4 %, и красный — ПС = 5 %), в качестве случайной величины следует рассматривать наработку N при наступлении одного из этих двух событий. Тогда за два показателя риска принимаются статистические вероятности случайных событий, которые заключаются в выходе значения наработки N за допустимый уровень $N^* = 1200$ заливок при ПС = 4 % и (или) ПС = 5 %:

$$Q_1(N^*) = P\{N > N^*, ПС > 4\%\},$$

$$Q_2(N^*) = P\{N > N^*, ПС > 5\%\}.$$

Для определения оценок Q_1 и (или) Q_2 необходимо накопить статистический материал, который позволит построить гистограммы наработок N при наступлении соответствующих событий.

Обоснование и рекомендации по продлению ресурса грузовых канатов заливочных кранов

Приведенные выше результаты открывают возможность постановки вопроса о продлении ресурса канатов стандарта EN 12385-4—2000 на заливочных кранах ЦВКС. Почти все канаты в рассмотренные календарные периоды эксплуатации были демонтированы при наработках, близких к регламентируемой $N^* = 1200$ заливок. При этом диагностированные показатели ПС оказались почти вдвое меньше предельно допустимого значения $ПС^* = 6\%$ с ничтожно малыми рисками выхода за этот предел. Очевидно, такое положение вещей является экономически невыгодным. Это обстоятельство дает основание утверждать, что срок службы (ресурс) грузовых канатов каждого крана может быть продлен относительно регламентируемого значения наработки $N^* = 1200$ заливок.

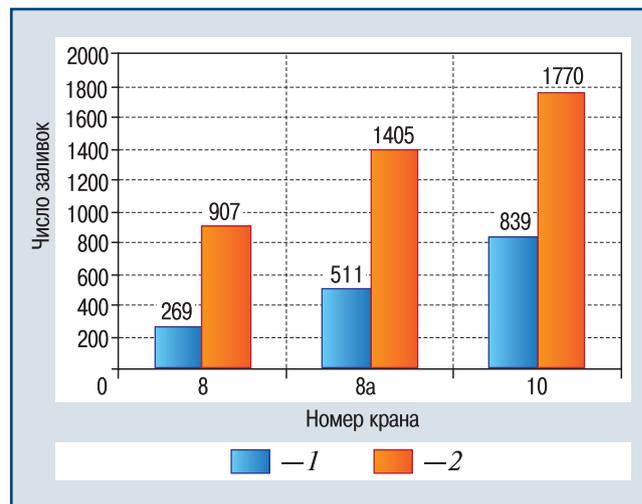
Обозначим через $\langle ПС \rangle$ — среднее значение основного диагностируемого параметра ПС при заменах отработавших канатов; $V_{ПС}$ — скорость изменения ПС к моменту замены канатов в условных единицах, которые означают отношение ПС (в процентах) к наработке N (числу заливок). В первом приближении дополнительный ресурс R эксплуатируемого каната можно оценить линейным прогнозом:

$$R = (ПС^* - \langle ПС \rangle) / V_{ПС}$$

В зависимости от значения параметра $V_{ПС}$ перед демонтажем отработавшего каната могут быть получены два решения. Консервативные оценки дополнительного ресурса R соответствуют максимальной скорости ПС, определяемой по имеющейся выборке из таблиц стойкости. Рискованные оценки параметра R соответствуют средней скорости ПС по данной выборке.

Прогнозируемые значения дополнительного ресурса при нормативном значении $ПС^* = 6\%$ представлены диаграммами на рис. 8 (здесь 1 — консервативный прогноз; 2 — рискованный прогноз).

На основании полученных оценок напрашивается вывод, что при $ПС^* = 6\%$ безопасное продление ресурса канатов сверх нормативного значения $N^* = 1200$ находится в диапазоне $R = 300-400$ заливок. В случае принятия решения о предельном значении $ПС^* = 7\%$ и при соблюдении существующей технологии заливки чугуна в конвертер ресурс грузовых канатов может быть продлен на $R = 400-500$ заливок. Более достоверные прогнозы (консервативный и рискованный) дополнительного ресурса возможны, если при заменах канатов будет иметь место относительно малый разброс соответствующих значений диагностируемого параметра ПС. В этом вопросе важен регламент диагностирования каната, в особенности при больших наработках. Опираясь



▲ Рис. 8. Возможный дополнительный ресурс канатов при условии, что скорость ПС оценивается по трем последним инспекциям

▲ Fig. 8. Possible additional service life of the ropes, provided that the speed of the Loss of Metallic Area is estimated by the last three inspections

на данные мониторинга, можно рекомендовать на начальном этапе эксплуатации каната (первые 300 заливок) проводить инспекцию с периодичностью $\Delta N = 30-40$ заливок, а далее (до $N^* = 1200$) — с периодичностью $\Delta N \approx 50-60$ заливок. Если же принимается решение о продлении ресурса до $N^* = 1500$, то интервал проведения дефектоскопии должен быть уменьшен до $\Delta N = 30-40$ заливок. При проявлении признаков ускоренной деградации ПС, а именно двух последовательных приращений $\Delta ПС > 1\%$, диагностирование каната следует проводить не реже, чем через $\Delta N = 20$ заливок. В случае зафиксированного «высокотемпературного нагрева» каната (температура наружных проволок внешних прядей превышает $200\text{ }^\circ\text{C}$) ресурс каната устанавливается с учетом предельного значения основного диагностического параметра $ПС^* = 6\%$ и не должен превышать $N^* = 1200$ заливок. В случае «перегрева» (температура наружных проволок каната превышает $250\text{ }^\circ\text{C}$) канат должен быть немедленно заменен.

Заключение

Грузовые канаты механизма главного подъема заливочных кранов в конвертерном цехе ПАО «Северсталь» подвергаются периодическим силовым нагрузкам и высокотемпературным воздействиям. Подобные условия работы весьма рискованны для канатов как несущих механических конструкций. Мониторинг технического состояния грузовых канатов с использованием инструментальных средств магнитного неразрушающего контроля, в том числе и автоматизированных дефектоскопов, играет важную роль в обеспечении безопасной работы талевой канатной системы заливочного крана.

Выполненный анализ показал, что развитие дефектов типа «потеря металлического сечения» по причине коррозионного, абразивного и фрикцион-

ного износа канатов сопровождается деградацией механических характеристик стали под влиянием интенсивных термоциклических воздействий. Эти обстоятельства необходимо учитывать при контроле температуры окружающей среды в зоне конвертера в процессе заливки чугуна, а также при назначении предельной наработки каната и допустимых значений диагностических параметров.

В дополнение к нормативной базе критериев браковки канатов механизма главного подъема заливочного крана предлагается ряд ограничений на эксплуатацию канатов, изготовленных по стандарту EN 12385-4—2000, диаметром D , равным 42 мм. Канат немедленно выводят из эксплуатации при обнаружении в процессе диагностирования хотя бы одного из следующих дефектов (повреждений): потери сечения, обусловленной термомеханическим воздействием, равной 7 % и более; обрыва пряди или металлического сердечника каната; наличия 5 обрывов на длине $6D = 252$ мм; наличия 10 обрывов на длине $30D = 1260$ мм; наличия 40 обрывов на длине $500D = 21\,000$ мм.

Эксплуатация каната также не допускается, если имеет место перекос траверсы крана, определяемый визуально, или наружные проволоки каната нагреваются до температуры 250 °С и выше.

Накапливаемые данные мониторинга и соответствующие вероятностные показатели могут служить основанием для корректировки регламента контроля технического состояния грузовых канатов заливочных кранов и обоснованного продления их нормативного ресурса при условии соблюдения допустимого температурного режима заливки чугуна.

Список литературы

1. *Правила безопасности опасных производственных объектов, на которых используются подъемные сооружения: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности.* — 2-е изд., испр. и доп. — Сер. 10. — Вып. 81. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2020. — 164 с.
2. *РД 10-231—98.* Стропы грузовые общего назначения. Требования к устройству и безопасной эксплуатации. URL: [https://www.snip-info.ru/Rd_10_-33-93_\(s_izm_-_rd_10-231-98\).htm](https://www.snip-info.ru/Rd_10_-33-93_(s_izm_-_rd_10-231-98).htm) (дата обращения: 20.01.2020).
3. *ISO 4309:2017(E).* Cranes — Wire ropes — Care and maintenance, installation, examination and discard. URL: <https://www.sis.se/api/document/preview/922803/> (дата обращения: 20.01.2020).
4. *Bridon.* Crane Rope Catalogue. URL: <https://www.yumpu.com/en/document/read/11749086/crane-rope-catalogue-bridon> (дата обращения: 20.01.2020).
5. *Hot Metal Cranes: What is Required?* URL: http://www.naicranes.com/engineering/technical_reports/hotmetal.pdf (дата обращения: 20.01.2020).
6. *Влияние термоциклических нагрузок на прочность каната литейных кранов/ В.П. Малов, А.Л. Кузьминов, В.Г. Попов и др.// Безопасность труда в промышленности.* — 1999. — № 11. — С. 30—32.

7. *Котельников В.С., Сухоруков В.В.* Дефектоскопия стальных канатов грузоподъемных кранов, подверженных тепловому воздействию// *Безопасность труда в промышленности.* — 2003. — № 8. — С. 19—21.

8. *Sukhorukov V.* Steel ropes NDT of cranes of metallurgical works// *International Journal of Transport & Logistics.* — 2007. — Vol. 7. — P. 45—50.

9. *Сухоруков В.В., Воронцов А.Н., Волоховский В.Ю.* Контроль износа канатов заливочных кранов металлургических предприятий// *Черные металлы.* — 2013. — № 10 (982). — С. 56—60.

10. *Vorontsov A., Volokhovskiy V., Sukhorukov V.* Hot metal Crane Ropes: Magnetic NDT, Capacity Simulation, Strength Safety, Temperature Criterion// *Proceedings of OIPEEC Conference.* — Oxford, 2013. — P. 33—42.

11. *Slesarev D., Sukhorukov D., Shpakov I.* Automated magnetic rope condition monitoring: concept and practical experience// *Proceedings of the OIPEEC Conference.* — La Rochelle, 2017. — P. 295—300.

12. *Сухоруков В.В., Котельников В.С.* Мониторинг состояния стальных канатов автоматизированными средствами технического диагностирования// *Безопасность труда в промышленности.* — 2019. — № 9. — С. 72—81. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-72-81

13. *Оценка несущей способности канатов заливочных кранов на основании данных лабораторных термических испытаний/ А.Н. Воронцов, В.Ю. Волоховский, В.И. Мирошниченко и др.// Вестник Московского энергетического института.* — 2018. — № 6. — С. 12—18.

14. *Влияние нагрева и термоциклирования на механические свойства канатной проволоки из углеродистой стали/ В.М. Матюнин, А.Ю. Марченков, П.В. Волков и др.// Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* — 2019. — Т. 85. — № 12. — С. 58—64.

15. *Chen Yu., Young B., Uy B.* Behavior of High Strength Structural Steel of Elevated Temperatures// *Journal of Structural Engineering.* — 2006. — Vol. 132. — № 12. — P. 1948—1954.

16. *Малиновский В.А.* Стальные канаты: аналитический справочник. — Одесса: Астропринт, 2016. — 252 с.

17. *Брайде В.И., Семенов Л.Н.* Надежность подъемно-транспортных машин. — Л.: Машиностроение, 1986. — 183 с.

18. *Bolotin V.V.* Mechanics of Fatigue. Mechanical Engineering Series. — Boca Raton: CRC Press, 1999. — 465 p.

vvolokhovskiy@intron.ru

Материал поступил в редакцию 27 января 2020 г.

«**Bezopasnost Truda v Promyshlennosti**»/ «**Occupational Safety in Industry**», 2020, № 5, pp. 7—16.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-7-16

Analysis of the Operational Reliability of the Hot-Metal Crane Cargo Ropes in Steelmaking

V.Yu. Volokhovskiy, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Group Leader, vvolokhovskiy@intron.ru

A.N. Vorontsov, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Lead Specialist

I.I. Shpakov, Group Leader

INTRON PLUS, Ltd., Moscow, Russia
V.V. Goncharov, Head of Diagnostics Service
PAO Severstal, Cherepovets, Russia

Abstract

When performing technological operations of casting the cast iron into the converter, the steel ropes of bridge casting cranes in steel-making workshops are subjected to cyclic power and high-intensity thermal loading. These operational factors lead to a decrease in the load-bearing capacity of the cargo ropes. Corrosion and abrasive wear of the ropes is accompanied by the change in the mechanical characteristics of the wires metal as a result of thermal cycling. Therefore, monitoring the current technical condition of cargo ropes is of great importance for ensuring filling cranes safe operation. Therefore, monitoring the current technical condition of cargo ropes is of great importance for ensuring hot-metal cranes safe operation. The article reflects the results of laboratory experiments and field tests concerning the study of the operating factors influence on the performance of the ropes of the hot-metal cranes of the converter steelmaking shop at PAO Severstal. Recommendations are given on the organization of monitoring, correction of the limit value of the allowable loss of cross-section for metal and the extension of the standard service life of cargo ropes of the mechanisms of the main lifting for filling cranes.

Key words: hot-metal cranes, steel ropes, magnetic flaw-detection, control instructions, operating defect, normative lifetime.

References

1. Safety rules for hazardous production facilities where lifting devices are used: Federal rules and regulations in the field of industrial safety. 2-e izd., ispr. i dop. Ser. 10. Iss. 81. Moscow: ZAO NTTs PB, 2020. 164 p. (In Russ.).
2. RD 10-231-98. General-purpose cargo slings. Requirements for the device and safe operation. Available at: [https://www.snip-info.ru/Rd_10-33-93_\(s_izm_-_rd_10-231-98\).htm](https://www.snip-info.ru/Rd_10-33-93_(s_izm_-_rd_10-231-98).htm) (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).
3. ISO 4309:2017(E). Cranes — Wire ropes — Care and maintenance, installation, examination and discard. Available at: <https://www.sis.se/api/document/preview/922803/> (accessed: January 20, 2020).
4. Bridon. Crane Rope Catalogue. Available at: <https://www.yumpu.com/en/document/read/11749086/crane-rope-catalogue-bridon> (accessed: January 20, 2020).
5. Hot Metal Cranes: What is Required? Available at: http://www.naicranes.com/engineering/technical_reports/hotmetal.pdf (accessed: January 20, 2020).
6. Malov V.P., Kuzminov A.L., Popov V.G., Tebnev S.A., Lipatov A.S. Influence of thermocyclic loads on the rope

strength of the foundry cranes. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 1999. № 11. pp. 30–32. (In Russ.).

7. Kotelnikov V.S., Sukhorukov V.V. Flaw detection of steel ropes of lifting cranes exposed to heat effect. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2003. № 8. pp. 19–21. (In Russ.).

8. Sukhorukov V. Steel ropes NDT of cranes of metallurgical works. *International Journal of Transport & Logistics*. 2007. Vol. 7. pp. 45–50.

9. Sukhorukov V.V., Vorontsov A.N., Volokhovskiy V.Yu. Control of wear of hot-metal crane ropes of the metallurgical enterprises. *Chernye metally = Ferrous metals*. 2013. № 10 (982). pp. 56–60. (In Russ.).

10. Vorontsov A., Volokhovskiy V., Sukhorukov V. Hot metal Crane Ropes: Magnetic NDT, Capacity Simulation, Strength Safety, Temperature Criterion. *Proceedings of OIPEEC Conference*. Oxford, 2013. pp. 33–42.

11. Slesarev D., Sukhorukov D., Shpakov I. Automated magnetic rope condition monitoring: concept and practical experience. *Proceedings of the OIPEEC Conference*. La Rochelle, 2017. pp. 295–300.

12. Sukhorukov V.V., Kotelnikov V.S. Monitoring of Steel Ropes Condition with Technical Diagnostics Automated Means. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2019. № 9. pp. 72–81. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-72-81

13. Vorontsov A.N., Volokhovskiy V.Yu., Miroshnichenko V.I., Gayduchenko V.V., Ustinov A.V. Assessment of bearing capacity of the hot-metal crane ropes based on the laboratory thermal tests. *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta = Vestnik MEI*. 2018. № 6. pp. 12–18. (In Russ.).

14. Matyunin V.M., Marchenkov A.Yu., Volkov P.V., Volokhovskiy V.Yu., Vorontsov A.N., Goncharov V.V. Effect of heating and thermal cycling on the mechanical properties of carbon steel wire rope. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials*. 2019. Vol. 85. № 12. pp. 58–64. (In Russ.).

15. Chen Yu., Young B., Uy B. Behavior of High Strength Structural Steel of Elevated Temperatures. *Journal of Structural Engineering*. 2006. Vol. 132. № 12. pp. 1948–1954.

16. Malinovskiy V.A. Steel ropes: Analytical guide. Odessa: Astroprint, 2016. 252 p. (In Russ.).

17. Braude V.I., Semenov L.N. Reliability of hoisting machines. Leningrad: Mashinostroenie, 1986. 183 p. (In Russ.).

18. Bolotin V.V. Mechanics of Fatigue. *Mechanical Engineering Series*. Boca Raton: CRC Press, 1999. 465 p.

Received January 27, 2020

ПАМЯТКА АВТОРУ

С авторов научно-технических статей, включая аспирантов, за публикацию их рукописей плата не взимается. Вознаграждение авторам не выплачивается. Электронная версия журнала с опубликованной статьей высылается каждому автору на его электронную почту.



В.Н. Бордаков,

канд. техн. наук, гл. конструктор,
fadtrdu@mail.ru

ООО «СОВА», Москва, Россия

Параметрическое обоснование оснащения объекта огнетушителями

Представлено описание алгоритма и метода параметрической оценки прогнозируемой эффективности огнетушителей. Показано, что существующие требования к параметрам огнетушителей не обеспечивают эффективную защиту оператора от влияния вредных факторов пожара. Представлены требования к основным параметрам огнетушителя, соблюдение которых соответствует условиям безопасного тушения пожара.

Ключевые слова: огнетушитель, пожаротушение, безопасность тушения пожара, эффективная дальность подачи, огнетушащее вещество.

Для цитирования: Бордаков В.Н. Параметрическое обоснование оснащения объекта огнетушителями // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 17–28. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-17-28

Введение

Как правило, возникновение пожара — полная неожиданность для любого человека и даже охраны объекта. Человек случайно оказывается в зоне пожара, естественно, без специальных средств индивидуальной защиты. Основным средством борьбы с огнем на начальной стадии развития пожара остается огнетушитель. Отсутствие или низкая пожаротушающая эффективность огнетушителя в оснащении объекта с высокой долей вероятности приводит к тяжелым происшествиям с людскими и материальными потерями. Своевременное обнаружение очага загорания и применение огнетушителя с минимальной задержкой, не превышающей 10–20 с, позволяют избежать трагических последствий. Образование опасных для жизни человека факторов пожара в замкнутом помещении происходит через 10–30 с от момента начала горения твердых горючих или в течение нескольких секунд после воспламенения горючей жидкости. Поэтому жизненно важно с минимальной задержкой применить огнетушитель для тушения обнаруженного очага, находясь в условиях окружающей среды, безопасной для человека. Приступая к тушению очага возгорания через 1–2 мин, человек подвергается прямому влиянию опасных факторов пожара: теплового потока из зоны горения, загазованности и задымленности помещения. Безопасное расстояние до обнаруженного очага горения (даже бытового пожара) увеличится до 5–6 м. В результате практически невозможно эффективное применение огнетушителя с малой дальностью подачи огнетушащего вещества (ОТВ) [1–6].

При выборе оснащённости объекта потребитель ориентируется на субъективное представление о

ранге очага пожара и декларируемые изготовителем технические характеристики огнетушителя. В общем случае обоснование выбора типоразмера и числа огнетушителей сводится к задаче обеспечения пожарной безопасности с минимальными экономическими затратами без анализа мрачных перспектив возможного ущерба [7].

Огнетушащая способность и основные параметры огнетушителей определяются в результате сертификационных испытаний, которые проводятся профессионалами в боевой одежде пожарного. Поэтому ранги потушенных модельных очагов пожара оказываются существенно завышенными по сравнению с тем, что реально может потушить неподготовленный человек. Следовательно, нормативные требования к испытаниям и тактико-технические параметры конструкции огнетушителя необходимо формировать с учетом обеспечения безопасности оператора, не имеющего специальной экипировки [8].

В настоящее время предлагаются различные методы оценки и критерии эффективности огнетушителей. Например, в работах [9–11] для оптимизации оснащённости объекта огнетушителями предложен параметр:

$$I(t) = \frac{R(S)P(t)}{[C_{\text{опт}}\varphi(t) + C_0]n}, \quad (1)$$

где $I(t)$ — условная эффективность, м²/руб.; $R(S)$ — огнетушащая способность, м²; $P(t)$ — вероятность тушения очага возгорания огнетушителем; $C_{\text{опт}}$ — стоимость огнетушителя, руб.; $\varphi(t)$ — поправочный коэффициент; C_0 — эксплуатационные затраты, руб.; n — число огнетушителей, необходимых для тушения очага пожара.

Существенным недостатком параметра $I(t)$ является то, что в соотношении (1) используется только огнетушащая способность и стоимость огнетушителя. Размерный анализ показывает, что обратная величина $1/I(t)$, руб/м², определяет удельную стоимость тушения единицы площади пожара при использовании огнетушителей различных типоразмеров. Практическая значимость параметра $I(t)$ сводится к оценке удельных экономических затрат на тушение единицы горячей поверхности.

В работах [12, 13] предложена методика определения эффективности порошковых огнетушителей по критериям теплофизического и конструктивного совершенства применительно к нефтебазам. Однако разработанный набор критериев и расчетных соотношений также не решает проблему обоснованного выбора огнетушителя потребителем.

Более совершенная методика расчета необходимого числа огнетушителей для защиты помещений разработана А.В. Матюшиным [14], в ней приводится ряд эмпирических соотношений, на основе которых можно рассчитать: безопасное расстояние от зоны горения до человека в зависимости от масштаба и класса очага пожара, условные границы безопасного применения огнетушителя, необходимое число огнетушителей для противопожарной защиты в зависимости от прогнозируемых условий тушения и геометрии помещения.

Методика [14], несмотря на то, что ограничена анализом условий применения углекислотных и порошковых огнетушителей, вносит существенный вклад в развитие фундаментальных принципов противопожарной безопасности.

Цель статьи — дальнейшее совершенствование и уточнение методики выбора эффективных огнетушителей, предназначенных для оснащения объекта, на основе анализа результатов сертификационных испытаний.

Физические параметры, определяющие применение огнетушителей

Переносной или передвижной огнетушитель — первичное средство пожаротушения с ограниченным запасом ОТВ, нормированными документацией характеристиками условий применения. Отсюда и радикальное отличие требований к формированию струи ОТВ на выходе из сопла огнетушителя по сравнению, например, с длительно работающими спринклерными системами.

Практика тушения пожаров показала, что уже через 20–30 с рекомендованные для спринклеров тонко распыленные потоки каплей ОТВ (диаметр каплей менее 150 мкм) просто не приемлемы для огнетушителей [15].

Во-первых, экспериментальные исследования тушения горящего керосина показали, что для устойчивого подавления очага пожара диаметр каплей должен превышать 300–500 мкм. Капли диаметром менее 150 мкм не достигают поверхности горящего

керосина и выносятся из зоны пламени. Частичное испарение мелких каплей в объеме пламени не приводит к тушению даже модельного очага диаметром около 200 мм с высотой пламени примерно 1 м [16–18]. Поэтому при выборе огнетушителя целесообразно отдавать предпочтение оснащенному соплами, что обеспечивает формирование ансамбля каплей ОТВ с характерным размером не менее 300–500 мкм.

Во-вторых, как следует из экспериментов, максимальная дальность подачи распыленного потока ОТВ со средним диаметром каплей менее 150 мкм не превышает 3–4 м. Эксперименты показали, что потушить тонко распыленной струей даже модельный очаг ранга 21В без защитной экипировки не удастся.

Проведенные эксперименты по тушению модельных очагов пожара оператором без средств специальной защиты подтвердили факт того, что дальность подачи ОТВ оказывается важнейшей характеристикой, которая гарантирует эффективность огнетушителя и безопасность оператора.

В соответствии с действующими нормативными документами допустимое расстояние от места прогнозируемого пожара до огнетушителя в помещениях класса Д и общественных зданиях составляет 70 м [19]. Фактически в этом требовании уже заложены фатальные последствия для человека, потому что по самым оптимистическим расчетам длительность доставки огнетушителя к месту пожара составит не менее 105 с [20, 21]. В то же время, по имеющимся данным, при возникновении бытового пожара через 30–120 с из-за развития опасных факторов практически исключается возможность применения огнетушителя с малой дальностью подачи ОТВ [5, 22, 23]. Следовательно, дальность подачи ОТВ на выходе из огнетушителя должна соответствовать прежде всего рангу очага пожара.

Для того чтобы задержка применения огнетушителя не превышала 15–20 с, необходимо уменьшить допустимую удаленность размещения огнетушителя от предполагаемого очага возгорания до 7–10 м [24–27].

Тепловое поражение эпителия лица и рук наступает достаточно быстро, поскольку в помещении увеличивается температура окружающей среды, а из зоны пламени на оператора действуют тепловой поток и токсичные продукты горения, из-за задымленности снижается видимость. Кроме того, известно, что все структуры глаза в некоторой степени поглощают инфракрасное (ИК) излучение. Инфракрасные лучи с длиной волны 0,7–1,4 мкм глубоко проникают в ткани человеческого организма, поглощаются кровью и кожным покровом. Проходя через роговицу и водянистую влагу передней камеры глаза, ИК-лучи воздействуют на сетчатку и способствуют развитию катаракты. Поэтому при разработке нормативов защиты профессиональных огнеборцев необходимо учитывать, при прочих равных условиях, и влияние ИК-излучения на глаза.

Сочетанное влияние радиационного и конвективного тепловых потоков, изменение температуры в помещении в совокупности с другими опасными факторами пожара не позволяют приблизиться к зоне горения без специального оснащения. В результате становится невозможным тушение или хотя бы временная локализация выявленного пожара. Очевидно, что у человека, не имеющего специальной экипировки и профессиональной подготовки, сработает инстинкт самосохранения, как следствие, огнетушитель превратится в бесполезное изделие, которое только создает у человека ложное чувство безопасности до пожара и мешает движению при быстром покидании опасной зоны. Важно, чтобы при пожаре, несмотря ни на что, оператор, не имея специальной защиты, мог применить огнетушитель и потушить или локализовать очаг горения. Часто это борьба за жизнь [7, 26].

Поэтому при планировании оснащения объекта огнетушителями необходимо учитывать не только ранги потушенных модельных очагов пожара, но и фактическую дальность подачи (длину струи) ОТВ, которая обеспечивает тушение очага пожара с безопасного для оператора расстояния. В действующей нормативно-технической документации таких требований нет. Целесообразно нормировать длину струи ОТВ на выходе из сопла как взаимно однозначную зависимость от ранга очага пожара. Нормирование требований к длине струи, размеру капель ОТВ позволит реально уменьшить или устранить влияние опасных факторов пожара на оператора и реализовать на практике эффективную противопожарную защиту объекта огнетушителями [2, 5, 14].

Для приближенной оценки безопасного расстояния до фронта пламени воспользуемся известными данными [5, 27]. Болевой порог переносимости теплового излучения у человека не превышает $N_{saf} = 0,6-1,2$ кВт/м². Интенсивность теплового потока от фронта пламени N_v , превышающая величину N_{saf} ¹, воспринимается как опасность для жизни. Поэтому при любой возможности человек покинет зону пожара без попыток применить огнетушитель.

В качестве необходимого и достаточного условия применения огнетушителя установим расстояние L_{saf} ¹, находясь за внешней границей которого, опасные факторы пожара не оказывают серьезного влияния на человека без дополнительных средств индивидуальной защиты, т.е. соблюдаются условия: $N_v < N_{saf}$. При длине струи ОТВ, меньшей безопасного расстояния L_{saf} , применение огнетушителя для тушения пожара оказывается неэффективным и невозможным. Экспериментально L_{saf} можно определить, например, по реакции на тепловой поток оператора

¹ По определению L_{saf} — расстояние от оператора до очага пожара, при котором возможно тушение без специальных средств защиты.

притушении стандартного модельного очага пожара без боевой одежды пожарного и средств защиты или с помощью физических средств измерений.

Условимся еще об одном термине, необходимом для дальнейшего анализа: эффективной длине струи ОТВ — L_m . Зная фактическую наибольшую дальность подачи струи ОТВ L_{max} , L_m представим в виде:

$$L_m = k_L L_{max}, \quad (2)$$

где k_L — поправочный коэффициент; L_{max} — наибольшая измеренная длина струи на выходе из среза сопла огнетушителя.

Тогда, в соответствии с предложенными определениями, очевидно, что если эффективная длина струи ОТВ L_m меньше дистанции безопасного применения L_{saf} , то нет смысла в постановке огнетушителя на оснащение в целях противопожарной защиты объекта.

Интенсивность теплового излучения при горении полимеров незначительно отличается от принятой для дерева. Горение бензина сопровождается более высокой интенсивностью излучения [4, 21, 28, 29]. Рассмотрим случай тушения модельного очага горящего бензина и твердого горючего — дерева.

На рис. 1 приведены расчетно-экспериментальные графики зависимости дальности безопасного расстояния «фронт пламени — оператор» от площади модельных очагов пожара классов А (дерево) и В (бензин АИ-95) (здесь 1, 2 — расчетные зависимости для горящего бензина [14, 27]; 3, 4 — экспериментальные графики зависимости длины безопасности, субъективно воспринимаемой оператором без защитной экипировки при тушении бензина и дерева соответственно). Графики построены без учета ветровой нагрузки. Оператор без защитной экипировки. Типоразмеры очагов пожара принимались по [30].

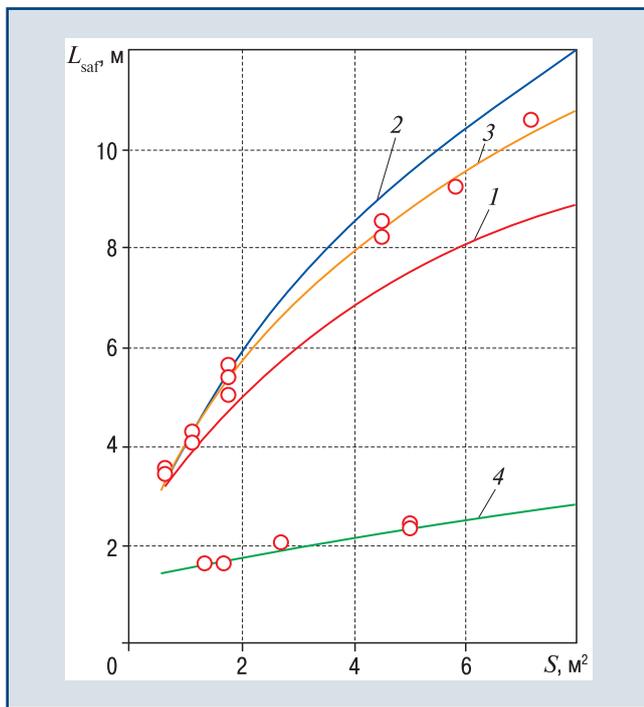
График 2 (см. рис. 1) построен на основе рекомендаций по расчету безопасного расстояния для тушения горючих жидкостей [14]:

$$L_p = 0,0748 \sqrt{\eta \Psi S_p^* Q_{pn}}, \quad (3)$$

где L_p — расчетная величина безопасного расстояния от очага пожара до человека, м; η — коэффициент полноты сгорания, $\eta = 0,9$; Ψ — удельная массовая скорость выгорания бензина, кг/(м²с); S_p^* — площадь пожара, м²; Q_{pn} — теплота сгорания бензина, кДж/кг.

Экспериментальные зависимости 3, 4 по длине безопасности определялись по субъективному восприятию как опасности различными людьми без защитной экипировки при модельных испытаниях по тушению очагов пожара классов А и В.

Анализ представленных расчетно-экспериментальных результатов показал, что при разработке мероприятий по обеспечению безопасности объекта в целом, а также человека, участвующего в тушении



▲ Рис. 1. Расчетно-экспериментальные данные изменения безопасного расстояния между очагом пожара и оператором в зависимости от площади свободной поверхности модельного очага пожара S
 ▲ Fig. 1. The calculated and experimental data of changes in the safe distance between the fire source and the operator depending on the free surface area of the standardized fire source S

пожара, необходимо учитывать требования по дальности подачи ОТВ. Зона безопасного применения огнетушителя L_{saf} ограничена как минимум графиком 1 (см. рис. 1). Откуда следует взаимно однозначное соответствие между эффективной длиной струи на выходе из сопла огнетушителя и площадью горящего очага пожара.

Из анализа представленных на рис. 1 расчетно-экспериментальных графиков следует, что для модельного очага пожара класса 55В ($1,75 \text{ м}^2$)¹ на удалении от фронта пламени около 4,5 м интенсивность теплового излучения превышает $1,2 \text{ кВт/м}^2$, что воспринимается человеком как опасность. Безопасным оператор воспринимает удаление от внешнего фронта пламени модельного очага ранга 55В на расстояние 5–6 м. Следовательно, для тушения модельного очага ранга 55В оператору без специального оснащения необходим огнетушитель с эффективной длиной струи $L_m > 5\text{--}6 \text{ м}$.

Для уточнения количественных параметров влияния длины струи ОТВ на эффективность применения огнетушителя проведены сравнительные испытания по тушению очагов пожара классов А и В непрофессиональными операторами в обычной одежде и профессиональными пожарными в

защитной одежде. Модельный очаг пожара тушили на открытом пространстве в безветренную погоду и при ветровой нагрузке до 4 м/с с дистанции, которую оператор полагал безопасной. Эксперименты проводили на очагах 1А ($4,7 \text{ м}^2$), 2А ($9,36 \text{ м}^2$), 21В ($0,65 \text{ м}^2$), 34В ($1,1 \text{ м}^2$), 55В, 183В ($5,75 \text{ м}^2$) и газовом факеле с секундным массовым расходом пропан-бутановой смеси $0,1\text{--}0,2 \text{ кг/с}$ (класс С) [8, 30, 31].

Серия экспериментов по тушению очага ранга 55В позволила подтвердить обоснованность выбранных условий безопасного тушения. В процессе тушения в результате эжекции воздуха в область горения потоком ОТВ и интенсификации перемешивания паров горючего с воздухом увеличивается мощность излучения, в результате оператор инстинктивно отступает от опасной зоны. По данным прямых измерений, интенсивность ИК-излучения в момент начала тушения модельного очага пожара ранга 55В увеличивается на $10\text{--}15 \%$.

Эксперименты с применением тонко распыленного ОТВ и порошковых огнетушителей с длиной струи $3\text{--}4 \text{ м}$ показали, что потушить существенно меньший модельный очаг возгорания ранга 34В без защитной одежды практически невозможно.

В соответствии с действующими правилами противопожарного режима на оснащение объектов рекомендуется использовать огнетушители с рангом потушенных очагов пожара не менее 55В и 2А. Поэтому бессмысленной тратой средств и времени следует признать принятие на оснащение объекта огнетушителей с дальностью подачи ОТВ $3\text{--}4 \text{ м}$ для тушения прогнозируемого очага пожара, эквивалентного модельному ранга 55В [20].

Проведенные эксперименты и анализ полученных экспериментальных данных позволяют сделать обоснованный вывод о жизненно важной необходимости уточнить требования к длине струи огнетушителя не в зависимости от массы заряда ОТВ, как это предусмотрено в [30, 31], а от ранга очага пожара (см. рис. 1). Результаты тушения очага пожара ранга 55В огнетушителем ОВЭ-5(з) приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расход ОТВ на тушение, л	Характерная дистанция от фронта пламени до оператора, м	Условия тушения
1,8	Около 2–3	Тушение модельного очага пожара в боевой одежде пожарного
1,9		
1,6		
2,8	Больше 6	Тушение модельного очага пожара в бытовой одежде
3,0		
2,9		

Наблюдаемое в эксперименте увеличение затрат ОТВ на тушение модельного очага пожара неподготовленным оператором в $1,6\text{--}1,7$ раза необходимо

¹ В скобках указана площадь поверхности горения модельного очага пожара.

также учитывать при выборе типоразмера огнетушителя для противопожарной защиты объекта.

Таким образом, из сравнительного анализа результатов расчета и физического моделирования процесса тушения огнетушителем следует, что эффективную длину струи необходимо нормировать не по массе или объему заряда ОТВ, а как взаимно однозначную зависимость от ранга модельного очага пожара и длины безопасности, за которой интенсивность излучения меньше 0,8–1,2 кВт/м² [2, 5, 14, 30, 31]; человек не применит огнетушитель, если дальность подачи ОТВ меньше, чем воспринимаемая субъективно дистанция безопасности. Слишком велик риск для жизни.

О надежности тушения пожара огнетушителями

Надежность противопожарной защиты объекта определяется совокупностью технических, эксплуатационных факторов, личностных особенностей и подготовленности персонала. В принятой системе сертификации рассматривается только надежность срабатывания конструкции огнетушителя.

Вопросы надежности обнаружения очага пламени и вероятности безошибочных действий персонала в работе отдельно не рассматриваются. По имеющимся данным, вероятность правильных действий экипажей самолетов в чрезвычайной ситуации не превышает 30 %. Видимо, не будет большим преувеличением, если для оценки адекватности действий персонала объекта для этапов обнаружения — оповещения — тушения или локализации обнаруженного очага возгорания огнетушителем использовать данные [32]. Поэтому важно, чтобы вероятность собственно тушения очага воспламенения огнетушителем была существенно большей.

Остановимся на анализе надежности собственно тушения пожара огнетушителем [9–11]. Надежность тушения огнетушителем очага возгорания зависит от ряда составляющих: наличия навыков применения первичного средства пожаротушения у персонала объекта, надежности тушения, надежности конструкции огнетушителя.

Рассмотрим гипотетический объект, оснащенный n огнетушителями, как систему параллельно соединенных элементов с показателями надежности конструкции $p_j(k)$ и собственно тушения модельного очага возгорания $p_j(t)$.

Допустим, что распределение отказов по тушению, т.е. очаг «потушен — не потушен», подчиняется показательному закону, как для равно надежных элементов [33, 34].

Тогда для системы из n параллельно соединенных элементов с известными показателями надежности $p_j(k)$, $p_j(t)$ и независимыми отказами можно рассчитать вероятность тушения очага возгорания:

$$P(t) = 1 - \prod_{j=1}^n [1 - p_j(k) p_j(t)], \quad (4)$$

где $P(t)$ — расчетная надежность тушения очага возгорания.

Отсюда следует соотношение для расчета необходимого числа огнетушителей n по заданной надежности тушения:

$$n = \frac{\ln [1 - P(t)]}{\ln [1 - p_j(k) p_j(t)]}. \quad (5)$$

Приемочную величину вероятности безотказной работы огнетушителя примем равной $p(k) = 0,996$ при рисках изготовителя и потребителя $\alpha = \beta = 0,2$ [34].

Данные по надежности процесса тушения порошковыми и водно-пенными огнетушителями модельного очага пожара ранга 144В (4,5 м²) приведены в работах Ю.Ф. Булгакова [9–11]. Эксперименты проводились в боевой защитной одежде пожарного. Вероятность тушения модельного очага пожара ранга 144В по результатам экспериментов с огнетушителями ОПш-10(з) и ОВП-10(з) составляет 0,87 и 0,98 соответственно [8–10].

Расчет минимально необходимого числа огнетушителей для защиты объекта по соотношению (8) с учетом экспериментальных данных, полученных в боевой одежде пожарного (см. табл. 1), показал, что при заданной вероятности тушения $P = 0,99$ необходимо: три огнетушителя ОПш-10(з) или один с массой заряда ОТВ не менее 30 кг, два огнетушителя ОВП-10(з) или один с массой заряда ОТВ не менее 20 кг.

При расчетной вероятности надежного тушения $P = 0,95$ достаточно: двух огнетушителей ОПш-10(з) или одного ОПш-20(з), одного огнетушителя ОВП-10(з).

Известно, что один огнетушитель более эффективен, чем два с эквивалентными объемами (массой) заряда ОТВ. Поэтому для надежной противопожарной защиты объекта целесообразно принимать на оснащение один огнетушитель с двойным запасом ОТВ относительно прогнозируемого очага пожара, что по порядку величины согласуется с экспериментом по тушению модельного очага пожара класса 55В неподготовленным оператором без защитной экипировки, где коэффициент необходимого запаса ОТВ составил 1,6–1,7 (параметры тушения модельных очагов возгорания класса В для огнетушителей различного типа [8–10] приведены в табл. 2).

Параметрическая оценка эффективности огнетушителей

Корректность сравнения огнетушителей различного типа основана на подобии физико-химиче-

Таблица 2

Тип огнетушителя	Расчетная вероятность тушения	Требуемое число огнетушителей
ОПш-10(з)	0,99	3
	0,95	2
ОВП-10(з)	0,99	2
	0,95	1

ских механизмов тушения, которые в основном определяются интенсивностью процессов тепломассообмена между продуктами сгорания и ОТВ [35].

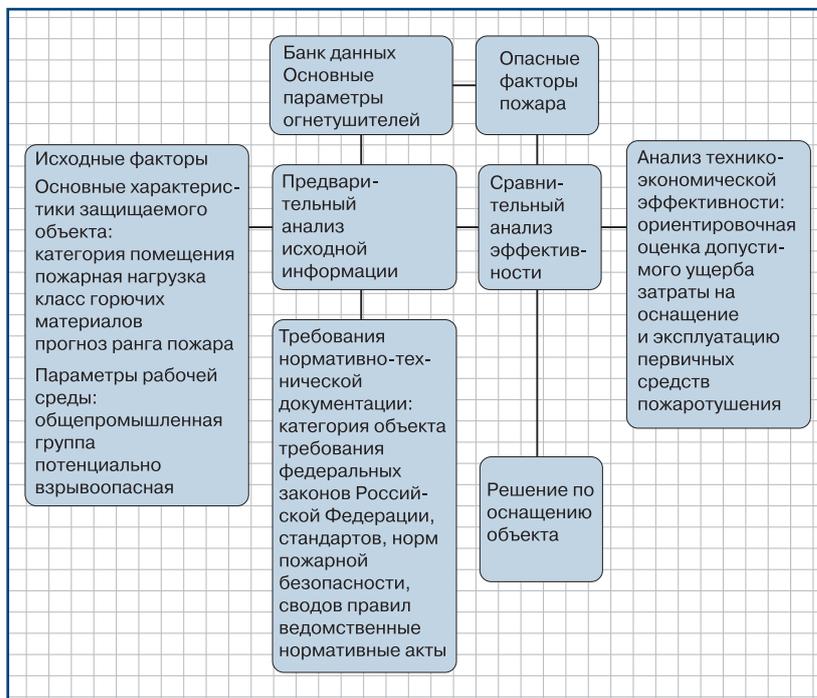
С практической точки зрения для формулировки ограничивающих условий применения огнетушителя целесообразно использовать выборку количественных характеристик, которые определяют эффективность тушения модельных очагов пожара различных ранга и класса, потушенных оператором с безопасной дистанции.

При оснащении объекта огнетушителями потенциальный потребитель, как правило, изучает паспорт, этикетку, доступные банки информации и каталоги производителей. На основе анализа паспорта или этикетки на корпусе огнетушителя, в которых указаны ранги потушенных модельных очагов пожара операторами в защитной одежде, у людей необоснованно формируется ложное чувство безопасности. Создается чрезвычайно опасная для человека ситуация: огнетушитель на объекте есть, а потушить очаг возгорания практически невозможно, например, из-за малой дальности подачи ОТВ. Существующая в настоящее время практика сертификации огнетушителей профессионалами в защитной экипировке без учета опасных факторов пожара противоречит реальной ситуации применения огнетушителя.

Наиболее сложной задачей при определении оснащённости объекта огнетушителями является обоснование нормированного ранга очага пожара на основе результатов расчета пожарной нагрузки [36]. Очевидно, что рекомендованное ранжирование параметров огнетушителей по категории защищаемых объектов и рангам очагов пожара требует уточнения [20]. Нормы оснащения огнетушителями предприятий торговли бытовой химией, лакокрасочными материалами и продуктовой палатки должны существенно различаться. Представляется целесообразным при анализе требований к огнетушителям для противопожарной защиты объектов нормировать не только классы и ранги очагов пожара, но и условия безопасного применения на основе рекомендаций [14, 21, 28].

На рис. 2 представлена примерная блок-схема алгоритма обоснования и выбора огнетушителя, учитывающая требования заказчика, совокупность технических характеристик, действующих стандартов и ведомственных нормативных актов.

Для сравнительного анализа параметров огнетушителей достаточно использовать общедоступную базу данных, основанную на результатах сертифи-



▲ Рис. 2. Блок-схема алгоритма выбора огнетушителя
▲ Fig. 2. Block diagram of the algorithm for fire extinguisher selection

кационных испытаний, и ввести дополнительные ограничения.

Например, в действующих нормативных документах предусмотрен ряд эксплуатационных ограничений: по массе единичного изделия, категории взрывозащиты, свойствам материала корпуса, классам и рангам потушенных модельных очагов пожара [36–38]. Очевидно, что формализованную запись условий эффективности огнетушителя можно построить на практически любой достоверной выборке параметров. Использование имеющейся в открытом доступе информации, представленной производителями, вполне достаточно для обоснованного выбора огнетушителей. Технические параметры огнетушителя нормируются требованиями стандартов и, безусловно, исполняются производителями. Поэтому для реального анализа допустимо исключить из рассмотрения такие характеристики, как погрешность дозирования, относительная доля нерасходного остатка ОТВ. Основополагающими параметрами, которые наиболее полно характеризуют эффективность огнетушителя, являются ранги потушенных модельных очагов пожара и дальность подачи ОТВ [30, 31].

В качестве условий, ограничивающих применение огнетушителя, предлагается рассмотреть частное от деления: ранга модельного очага, потушенного при сертификации, к прогнозируемой величине пожара; фактической дальности подачи ОТВ к дистанции безопасного применения L_{saf}

Рассмотрим два варианта определения параметров огнетушителя при испытаниях: в боевой одежде

пожарного, без боевой экипировки (тушение модельного очага с дистанции безопасного применения).

В варианте, когда параметры огнетушителя определены в боевой одежде пожарного, ограничивающие неравенства запишем в виде:

$$R_{A m} / R_A \geq k_A; \quad (6)$$

$$R_{B m} / R_B \geq k_B; \quad (7)$$

$$L_m / L_{\text{saf} A} \geq k_{L A}; \quad (8)$$

$$L_m / L_{\text{saf} B} \geq k_{L B}, \quad (9)$$

где $R_{A m}$, $R_{B m}$, — ранги модельных очагов пожара классов А, В, потушенных при сертификации огнетушителя; R_A , R_B — прогнозируемые для защищаемого объекта ранги очагов пожара классов А, В; k_A , k_B — безразмерные коэффициенты запаса по величине рангов пожара; $L_{\text{saf} A}$, $L_{\text{saf} B}$ — дистанция безопасного применения огнетушителя, соответствующая рангу модельного очага пожара классов А, В, м; $k_{L A}$, $k_{L B}$ — коэффициенты запаса по дальности подачи ОТВ.

Абсолютную величину коэффициентов запаса k_A , k_B , $k_{L A}$, $k_{L B}$ примем с учетом расчета надежности и экспериментов по тушению пожара огнетушителем в пределах 1,7–3.

При наличии результатов тушения модельных очагов пожара без боевой одежды пожарного граничное соотношение применимости огнетушителя запишем в виде неравенств:

$$1 \leq R_{A m} / R_A \leq k_n; \quad (10)$$

$$1 \leq R_{B m} / R_B \leq k_n; \quad (11)$$

$$1,1 \leq L_m / L_{\text{saf} A} \leq 1,2; \quad (12)$$

$$1,1 \leq L_m / L_{\text{saf} B} \leq 1,2, \quad (13)$$

где k_n — необходимый для оснащения объекта запас ОТВ или минимально необходимое число огнетушителей, но не менее расчетной величины n (5).

Это ограничение обосновано тем, что в относительных единицах параметры, измеренные по результатам сертификационных испытаний, должны превышать номинальные величины с назначенным запасом эффективности. Если любой из параметров не соответствует требованиям неравенств (9)–(13), то огнетушитель не допускается к эксплуатации на защищаемом объекте.

Требования по безопасному применению огнетушителя при тушении пожаров, в том числе без отключения электроснабжения постоянного и (или) переменного токов промышленной частоты, или в потенциально взрывоопасных средах учтем с помощью общепринятой дельта-функции:

$$\delta_E, \delta_{Ex}: \begin{cases} 1; \\ 0, \end{cases}$$

где δ_E принимаем равным 1 при наличии сертификата на тушение очагов пожара класса Е и 0 при его отсутствии; δ_{Ex} принимаем равным 1 при наличии сертификата на тушение очагов пожара класса Ex и 0 при его отсутствии.

Пожары делятся на классы А, В только условно. Фактически как физическое явление реальный пожар представляет собой сочетание очагов горения различных рангов и классов [39]. Например, на предприятии, использующем легковоспламеняющиеся жидкости (ЛВЖ) в таре объемом 0,5–1 л, при случайном проливе или разрушении упаковки образуется разлив горючей жидкости на площади 0,6–1 м², что эквивалентно очагам ранга 21В–34В. Понято, что воспламенение ЛВЖ приведет к развитию пожара и возгоранию отделочных материалов, стеллажей, бытовых предметов. Поэтому огнетушитель следует выбирать с расчетом на одновременное тушение очагов пожара классов А и В.

В качестве примера рассмотрим требования к оснащению общественных зданий. Для обеспечения пожарной безопасности объектов класса Д и общественных зданий необходимо использовать огнетушители с огнетушащей способностью не менее 2А, 55В (Приложение 1 [20]). Тогда, в соответствии с графиками (см. рис. 1), дальность безопасного применения огнетушителя для тушения очагов рангов 2А и 34В составит не менее: $L_{\text{saf}} = 3$ м и $L_{\text{saf}} = 4$ м соответственно. В качестве ограничивающих условий воспользуемся неравенствами (9)–(13). Вероятность тушения примем не ниже 0,99.

Для дальнейшего анализа рассмотрим сводную выборку параметров переносных огнетушителей, декларированных различными производителями, представленную в табл. 3, и основные параметры сравниваемых передвижных огнетушителей, представленных в табл. 4.

Из данных табл. 3 следует, что, несмотря на декларированную эффективность тушения в боевом защитном комплекте пожарного и значительные по масштабам ранги потушенных модельных очагов пожара, применить огнетушители № 1–7 невозможно, поскольку из-за малой дальности подачи ОТВ не достигнет очага горения даже при наличии у оператора двух огнетушителей. Необходимы огнетушители, для которых требования неравенств (9), (10), безусловно, выполняются.

Результаты сравнительного расчета эффективности позволяют обоснованно рекомендовать для тушения очага пожара, эквивалентного рангам 2А и 34В, огнетушители № 8–10 (см. табл. 3). Для обеспечения безопасности объекта достаточно огнетушителя типоразмера № 8 или 9 (см. табл. 3). Применение огнетушителя большего типоразмера № 10 следует признать технически избыточным и экономически нецелесообразным.

Таблица 3

Типоразмер огнетушителя	Дальность подачи ОТВ, м			Заявленные ранги		R_{Am}/R_A	R_{Bm}/R_B	L_m/L_{safA}	L_m/L_{safB}	Заключение
	Максимальная	Эффективная								
		L_{max}	k	L_m	R_{Am}					
Модельные очаги пожара потушены в боевой одежде пожарного										
1. Тип 5(з)-р	4,5	0,15	0,7	2А	70В	$1,0 < 1,7$	2,10	0,23	0,09	Не соответствует условиям (9)–(13). Не допускается к эксплуатации на объекте
2. Тип 10(з)-р	4,5	0,15	0,7	4А	144В	2,0	4,20	$0,14 < 1,20$	0,09	
3. Тип 10g	Больше 4,0	0,25	1,0	—	55В	—	1,60	—	0,17	
4. Тип 5(з)-2f	5,0	0,80	4,0	2А	183В	1,0	3,30	1,60	1,00	
5. Тип 5(з)-2-1	4,0	0,20	0,8	3А	89В	1,5	2,60	0,26	0,20	
6. Тип 6(з)-2f	4,0	0,80	3,2	2А	55В	1,0	1,61	1,00	0,80	
7. Тип 10(з)-2f2	4,0	0,80	3,2	3А	144В	1,5	4,20	1,33	0,80	
Модельные очаги пожара потушены в боевой одежде пожарного										
8. Тип 5(з)-1ff	9,0	0,80	7,2	2А	55В	1,0	1,60	2,40	2,30	Соответствует требованиям (9)–(13)
9. Тип 10(з)-1ff	10,0	0,80	8,0	4А	144В	2,0	4,20	2,60	2,10	
10. Тип 20(з)-1ff	16,0	0,80	16,0	6А	233В	3,0	5,03	2,00	4,20	

Примечание. Принятые индексы типов огнетушителей: р — порошковый, g — углекислотный, f — водно-пенный, ff — воздушно-эмульсионный.

Таблица 4

Типоразмер огнетушителя	Дальность подачи ОТВ, м			Заявленные ранги		R_{Am}/R_A	R_{Bm}/R_B	L_m/L_{safA}	L_m/L_{safB}	Заключение
	Максимальная	Эффективная								
		L_{max}	k	L_m	R_{Am}					
Модельные очаги пожара потушены в боевой одежде пожарного										
1. Тип 25(з)-р	6	0,15	1,0	6А	233В	$1,5 < 1,7$	1,6	0,25	0,1	Не соответствует условиям (9)–(13). Не допускается к эксплуатации на объекте
2. Тип 40(з)-р	6	0,15	1,0	6А	233В	1,5	1,6	0,25	0,1	
3. Тип 100(з)-р	6	0,15	1,0	10А	233В-2	2,5	1,9	0,25	0,1	
4. Тип 100(з)-2f	6	0,80	4,8	10А	233В-2	1,0	1,9	0,80	0,6	
5. Тип 80(з)-2f	6	0,80	4,8	6А	233В-2	1,5	1,9	0,80	0,6	
Модельные очаги пожара потушены без защитной экипировки пожарного										
6. Тип 25(з)-1ff	16	0,80	12,8	6А	183В	1,5	1,3	3,20	1,6	Соответствует требованиям (9)–(13)
7. Тип 40(з)-1ff	16	0,80	12,8	10А	183В	2,5	1,3	3,20	1,6	
8. Тип 50(з)-1ff	16	0,80	12,8	10А	233В	2,5	5,3	3,20	1,6	

Примечание. То же, что в табл. 3.

Помещения категорий А, Б, В1–В4 необходимо оснащать огнетушителями с рангами тушения модельных очагов 4А, 144В (см. приложение 1 [20]).

В соответствии с графиками (см. рис. 1) дальность безопасного применения огнетушителя для тушения очагов рангов 4А и 144В составит не менее: $L_{saf} = 4$ м и $L_{saf} = 8$ м соответственно. В качестве ограничивающих условий используем неравенства (9) и (10) при вероятности тушения не ниже 0,99. Отметим, что с учетом требований действующей нормативно-технической документации для противопожарной защиты таких помещений необходимо использовать передвижные огнетушители [31, 39].

Рассмотрим требования к оснащению помещения, в котором по предварительному прогнозу придется тушить пожар классов 4А и 144В без отключения электроснабжения постоянного (переменного)

тока промышленной частоты напряжением до 1000 В. Очевидно, что первичным критерием отбора является наличие сертификата на тушение пожара класса Е [40]. Поэтому к рассмотрению допускаются изделия, сертифицированные в установленном порядке для тушения пожаров без отключения электроснабжения (класс Е). Основные технические характеристики передвижных огнетушителей представлены в табл. 4.

Сравнительный анализ представленных в табл. 4 характеристик с результатами расчета условий безопасного применения (неравенства (9)–(13)) показывает, что для обеспечения пожарной безопасности допускается использовать передвижные огнетушители с дальностью подачи ОТВ не менее 12 м.

Несмотря на декларируемые производителями высокие ранги потушенных модульных очагов по-

жара (см. табл. 4, № 1–5), для тушения в реальных условиях удастся использовать огнетушители № 6–8 с дальностью подачи ОТВ более 10–12 м. Для обеспечения противопожарной защиты рассмотренного объекта, как показали эксперименты, достаточно одного изделия с объемом заряда 25 л. Остаток ОТВ после тушения очага 233В составил примерно 9 л. Однако с большим запасом безопасности можно рекомендовать использовать два огнетушителя № 6 или один огнетушитель № 8. Применение огнетушителя № 9, хотя и не повредит делу пожарной безопасности, представляется избыточным.

Открытым остается вопрос о размещении передвижного огнетушителя в зданиях категорий А, Б, В1–В4. Видимо, не будет большой ошибки, если назначенная удаленность передвижного огнетушителя от предполагаемого очага возгорания с учетом длины рукава не менее 4 м не превысит 16 м. Для решения вопроса об оптимальном размещении передвижного огнетушителя необходимо провести тщательное исследование и анализ реальных ситуаций на объектах различных категорий.

Применение передвижного огнетушителя сопряжено с более длительным временем пребывания оператора в зоне пожара (по оценкам, более 40–60 с). Следует признать, что с точки зрения безопасности оператора следует обеспечить элементарными средствами защиты органов дыхания. Например, комплектом, включающим лицевую маску с соответствующим фильтром для очистки от опасных газофазных и конденсированных продуктов горения, рассчитанным на эффективную работу до 10–15 мин.

Таким образом, предлагаемый алгоритм позволяет уточнить количественные и качественные требования к оснащению объекта действительно эффективными огнетушителями, которые реально обеспечат противопожарную защиту и безопасность персонала. Несомненно, что такой подход к анализу и оценке параметров огнетушителей потребует корректировки существующей нормативно-технической документации, дальнейшего совершенствования методик испытаний, уточнения количественных и качественных характеристик и требований к первичным средствам пожаротушения.

Заключение

Предложены алгоритм и методика оснащения объекта, учитывающие фактические параметры огнетушителя, условия безопасности для оператора и надежность тушения.

Проведенный анализ показал, что для повышения пожарной безопасности объектов необходимо внести уточнения в действующую нормативно-техническую документацию.

Список литературы

1. Мурзинов В.Л., Паршин М.В. Моделирование температуры в помещении при наличии открытого пламени в

условиях свободной конвекции// Пожаровзрывобезопасность. — 2014. — Т. 23. — № 12. — С. 28–33.

2. Кошмаров Ю.А., Башкирцев М.П. Термодинамика и теплопередача в пожарном деле: учеб. — М.: ВИПТШ МВД СССР, 1987. — 440 с.

3. Исаева Л.К., Никитина Г.С., Сулименко В.А. Пожарная и экологическая безопасность жилых зданий// Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25. — № 6. — С. 19–26. DOI: 10.18322/PV.2016.25.06.19-26

4. Горев В.А., Салымова Е.Ю. Влияние условий газообмена и начальной температуры на формирование опасных факторов пожара на начальной стадии его развития// Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22. — № 1. — С. 63–68.

5. Экспресс-оценка безопасных расстояний до пожарной нагрузки с учетом расчетного времени эвакуации людей/ В.И. Козлачков, И.А. Лобаев, Е.А. Ягодка и др.// Технологии техносферной безопасности. — 2015. — № 4 (62). — С. 74–83.

6. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. — М.: Стройиздат, 1990. — 424 с.

7. Уилмот Т., Пэйш Т. Ужасающие показатели смертности при пожарах в восточной Европе// Пожаровзрывобезопасность. — 2003. — Т. 12. — № 1. — С. 17–18.

8. Курбатский О.М., Смелков Г.И., Исавнин Н.В. Методика оценки огнетушащей способности огнетушителей. — М.: ВНИИПО, 1976. — 19 с.

9. Булгаков Ю.Ф., Варшавский С.Ю. Обеспечение эффективности тушения экзогенных пожаров в угольных шахтах// Горная промышленность. — 2009. — № 5 (87). — С. 51–55.

10. Булгаков Ю.Ф. Классификация, комплексная оценка и пути повышения эффективности шахтных огнетушителей// Горноспасательное дело: сб. науч. тр. — Донецк: НИИГД, 1998. — С. 40–46.

11. Булгаков Ю.Ф. Тушение пожаров в угольных шахтах: моногр. — Донецк: НИИГД, 2001. — 280 с.

12. Кожевин Д.Ф. Методика комплексной оценки эффективности огнетушителей (применительно к пожароопасным производственным объектам нефтебаз): дис. ... канд. техн. наук. — СПб, 2011. — 167 с.

13. Сытдыков М.Р., Кожевин Д.Ф., Поляков А.С. Оценка совершенства пневматического тракта порошковых огнетушителей на основе метода анализа размерностей// Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21. — № 4. — С. 51–54.

14. Матюшин А.В., Матюшин Ю.А. Методика расчета количества переносных огнетушителей, необходимого для защиты помещения здания (сооружения) от пожара// Пожарная безопасность. — 2003. — № 1. — С. 52–60.

15. Тагиев Р.М. Луч света в темном царстве// Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21. — № 4. — С. 83–84.

16. НПБ 88—2001. Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200016069> (дата обращения: 20.01.2020).

17. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование особенностей движения капель распыленной тушащей жидкости на входе в зону пламени// Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22. — № 12. — С. 16–22.

18. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. О некоторых физических закономерностях испарения распыленной воды при движении через высокотемпературные продукты сгорания// Известия Томского политехнического университета. — 2013. — Т. 323. — № 2. — С. 201–207.
19. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Экспериментальное исследование интегральных характеристик испарения пресной и соленой воды при движении через пламя// Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. — 2014. — № 2. — С. 18–23.
20. О противопожарном режиме (с изменениями на 20 сент. 2019 г.): постановление Правительства Рос. Федерации от 25 апр. 2012 г. № 390. URL: <http://docs.cntd.ru/document/902344800> (дата обращения: 20.01.2020).
21. Выборнов Ю.Э. Определение потребности объектов в огнетушителях// Огнетушащие порошковые средства: сб. науч. тр. — М.: ВНИИПО, 1985. — С. 97–103.
22. Анализ нормативного регулирования порошковых составов и огнетушителей в России и за рубежом/ Е.В. Краснов, М.Н. Вайсман, А.С. Смирнов, С.А. Смирнов// Пожаровзрывобезопасность. — 2013. — Т. 22. — № 1. — С. 7–14.
23. Изерушев Д.Е., Хабиров В.Г. Проблемы тушения пожара в высотных зданиях и зданиях повышенной этажности// Молодежный вестник УГАТУ. Технические науки. — 2019. — № 1 (20). — С. 75–80.
24. Технические требования к беспилотным авиационным системам, предназначенным для тушения пожаров в зданиях повышенной этажности/ Д.М. Гордиенко, Е.В. Павлов, Ю.Н. Осипов и др.// Пожарная безопасность. — 2019. — № 2. — С. 54–61.
25. Пузач С.В., Пузач В.Г., Доан В.М. К определению показателя токсичности продуктов горения горючих веществ и материалов в помещении// Пожаровзрывобезопасность. — 2011. — Т. 20. — № 4. — С. 4–13.
26. Пузач С.В., Сулейкин Е.В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении// Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25. — № 2. — С. 13–20. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20
27. Пузач С.В., Неуен Д.Т. Критические времена воздействия монооксида углерода на человека при пожаре в помещении// Пожаровзрывобезопасность. — 2016. — Т. 25. — № 11. — С. 27–34. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.27-34
28. ГОСТ Р 12.3.047—2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (дата обращения: 20.01.2020).
29. Асеева Р.М., Заиков Г.Е. Горение полимерных материалов. — М.: Наука, 1981. — 280 с.
30. ГОСТ Р 51057—2001. Техника пожарная. Огнетушители переносные. Общие технические требования. Методы испытаний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200027410> (дата обращения: 20.01.2020).
31. ГОСТ Р 51017—2009. Техника пожарная. Огнетушители передвижные. Общие технические требования. Методы испытаний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071946> (дата обращения: 20.01.2020).

32. Полтавец В.А. Ошибки летного состава в статистике аварийности гражданских самолетов и меры по предотвращению их повторения// 6-я Всерос. науч. конф. «Человеческий фактор в авиации и космонавтике: потенциал и ресурсы». URL: http://www.crown-airforce.narod.ru/aviaprom/Poltavets/errors_norepeat.html (дата обращения: 20.01.2020).
33. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. — М.: Мир, 1984. — 318 с.
34. ГОСТ Р 27.403—2009. Надежность в технике (ССНТ). Планы испытаний для контроля вероятности безотказной работы. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200078695> (дата обращения: 20.01.2020).
35. Абдурагимов И.М. О механизмах огнетушащего действия средств пожаротушения// Пожаровзрывобезопасность. — 2012. — Т. 21. — № 4. — С. 60–82.
36. Пожарная нагрузка. Справочник. СИТИС-СПН-1. Редакция 3. URL: <https://fireman.club/literature/pozharnaya-nagruzka-spravochnik-redaktsiya-3/> (дата обращения: 20.01.2020).
37. ГОСТ Р ЕН 1127-1—2009. Взрывоопасные среды. Взрывозащита и предотвращение взрыва. Часть 1. Основополагающая концепция и методология. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200075486> (дата обращения: 20.01.2020).
38. ГОСТ Р ЕН 13463-1—2009 (EN 13463-1—2001). Оборудование неэлектрическое, предназначенное для применения в потенциально взрывоопасных средах. Часть 1. Общие требования. URL: https://sibcontrols.com/uploaded/pdf/gost_r_en_13463-1-2009.pdf (дата обращения: 20.01.2020).
39. СП 9.13130.2009. Техника пожарная. Огнетушители. Требования к эксплуатации. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071152> (дата обращения: 20.01.2020).
40. ГОСТ 27331—87. Пожарная техника. Классификация пожаров. URL: <http://docs.cntd.ru/document/gost-27331-87> (дата обращения: 20.01.2020).

fadtrdu@mail.ru

Материал поступил в редакцию 17 февраля 2020 г.

**«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 17–28.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-17-28**

Parametric Justification for Equipping the Object with Fire Extinguishers

V.N. Bordakov, Cand. Sci. (Eng.), Chief Designer,
fadtrdu@mail.ru
LLC «SOVA», Moscow, Russia

Abstract

The article describes the algorithm and the method of parametric assessment of fire extinguishers predicted efficiency. It is shown that the current requirements for the parameters of fire extinguishers do not ensure efficient protection of the operator from the effects of harmful fire factors. The test results and the parameters of fire extinguishers declared by the manufacturers are presented.

Based on the experiments, the requirement for the range of supply of the extinguishing agent as the most important factor

in the successful use of a fire extinguisher to extinguish a fire is substantiated. The concept is introduced concerning the effective jet length at the exit of the extinguisher nozzle. The requirements for the main parameters of a fire extinguisher are given, compliance with which corresponds to the conditions for safe fire - fighting. Substantiation is provided related to the need of fire extinguisher stock or the presence of an additional fire extinguisher. The results are based on the analysis of a database of fire extinguishers of various types and volumes. Fire experiments were carried out on the standardized fire sources. Extinguishing was performed by the operators in protective clothing and without protective equipment, but from the distance of fire extinguisher safe usage. The algorithm is proposed related to fire extinguisher selection for the object equipping taking into account physical properties of the environment and fire- fighting conditions.

Based on the calculation analysis, a safe distance from the operator without protective equipment to the outer edge of the flame of the standardized fire sources was determined. The obtained calculation results are confirmed by the experiments on extinguishing standardized fire sources using solid fuel (firewood) and liquids (gasoline). The supply range of the extinguishing agent should be normalized, considering the rank of the standardized fire source, and not the size of the extinguisher.

From the comparative calculation and experimental analysis, it follows, that for extinguishing the standardized fire source with a reliability of no worse than 0,99, it is advisable to use one extinguisher with a double stock of extinguishing agent or two extinguishers.

The algorithm and the method of equipping an object are proposed considering the actual parameters of fire-extinguisher, safety conditions for the operator and the extinguishing reliability. The conducted analysis showed that in order to increase the fire safety of the facilities, it is required to make corrections in the current normative-technical documentation.

Key words: fire extinguisher, fire extinguishing, fire-fighting safety, efficient supply range, fire extinguishing agent.

References

1. Murzinov V.L., Parshin M.V. Modeling of the room temperature in the presence of an open flame under the conditions of free convection. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2014. Vol. 23. № 12. pp. 28–33. (In Russ.).
2. Koshmarov Yu.A., Bashkirtsev M.P. Thermodynamics and heat transfer in the fire-fighting: textbook. Moscow: VIPTSh MVD SSSR, 1987. 440 p. (In Russ.).
3. Isaeva L.K., Nikitina G.S., Sulimenko V.A. Fire and environmental safety of residential buildings. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2016. Vol. 25. № 6. pp. 19–26. (In Russ.). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.06.19-26
4. Gorev V.A., Salyмова E.Yu. Influence of gas exchange conditions and initial temperature on the formation of dangerous fire factors at the initial stage of its development. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2013. Vol. 22. № 1. pp. 63–68. (In Russ.).
5. Kozlachkov V.I., Lobaev I.A., Yagodka E.A., Bogatov A.A., Protchenko A.Yu. Rapid assessment of safe distances to the fire load taking into account the estimated time of people evacuation.

- Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti = Technology of Technosphere Safety*. 2015. № 4 (62). pp. 74–83. (In Russ.).
6. Drayzdeyl D. Introduction to the dynamics of fires. Moscow: Stroyizdat, 1990. 424 p. (In Russ.).
7. Uilmot T., Peysh T. Horrifying Fire Mortality Rate in the Eastern Europe. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2003. Vol. 12. № 1. pp. 17–18. (In Russ.).
8. Kurbatskiy O.M., Smelkov G.I., Isavnin N.V. Methodology for evaluating the extinguishing ability for fire extinguishers. Moscow: VNIPO, 1976. 19 p. (In Russ.).
9. Bulgakov Yu.F., Varshavskiy S.Yu. Ensuring the efficiency of extinguishing freely burning fires in the coal mines. *Gornaya promyshlennost = Mining Industry*. 2009. № 5 (87). pp. 51–55. (In Russ.).
10. Bulgakov Yu.F. Classification, comprehensive assessment and ways to improve the efficiency of mine fire extinguishers. Gornospasatelnoe delo: sb. nauch. tr. (Mine rescue work: collection of research papers). Donetsk: NIIGD, 1998. pp. 40–46. (In Russ.).
11. Bulgakov Yu.F. Extinguishing of fires in the coal mines: monograph. Donetsk: NIIGD, 2001. 280 p. (In Russ.).
12. Kozhev D.F. Methodology for the comprehensive assessment of fire extinguishers efficiency (in relation to fire hazardous production facilities of oil depots): thesis... Candidate of Technical Sciences. Saint-Petersburg, 2011. 167 p. (In Russ.).
13. Sytdykov M.R., Kozhev D.F., Polyakov A.S. Evaluation of the perfection of the pneumatic tract of powder-type extinguishers based on the dimensional analysis method. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2012. Vol. 21. № 4. pp. 51–54. (In Russ.).
14. Matyushin A.B., Matyushin Yu.A. The methodology for calculating the number of portable fire extinguishers required for protection of the building (structure) premises from fire. *Pozhar-naya bezopasnost = Fire Safety*. 2003. № 1. pp. 52–60. (In Russ.).
15. Tagiev R.M. A ray of light in the realm of darkness. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2012. Vol. 21. № 4. pp. 83–84. (In Russ.).
16. NPB 88—2001. Fire extinguishing and alarm installations. Design norms and rules. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200016069> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).
17. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental study of the specifics of the movement of droplets of sprayed extinguishing liquid at the entrance to the flame zone. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2013. Vol. 22. № 12. pp. 16–22. (In Russ.).
18. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. On some physical regularities of evaporation of the atomized water when moving through high-temperature combustion products. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. = Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013. Vol. 323. № 2. pp. 201–207. (In Russ.).
19. Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. Experimental study of the integral characteristics of the evaporation of fresh and salt water when moving through a flame. *Pozhary i chrezvychaynye situatsii: predotvrashchenie, likvidatsiya = Fire and emergencies: prevention, elimination*. 2014. № 2. 18–23. (In Russ.).
20. On fire prevention regime (as amended on September 20, 2019): Decree of the Government of the Russian Federation of

April 25, 2012 № 390. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902344800> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

21. Vybornov Yu.E. Determining the needs of objects in fire extinguishers. *Ognetchashchie poroshkovye sredstva: sb. nauch. tr. (Fire extinguishing powder products: Collection of the scientific papers)*. Moscow: VNIPO, 1985. pp. 97–103. (In Russ.).

22. Krasnov E.V., Vaysman M.N., Smirnov A.S., Smirnov S.A. Regulatory analysis of powder composition and fire extinguishers in Russia and abroad. *Pozharovzryvbezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2013. Vol. 22. № 1. pp. 7–14. (In Russ.).

23. Izerushev D.E., Khabirov V.G. Problems of fire extinguishing in tall buildings and high-rise buildings. *Molodezhnyy vestnik Ufimskogo gosudarstvennogo aviatsionnogo tekhnicheskogo universiteta = Youth Bulletin of the Ufa State Aviation Technical University*. 2019. № 1 (20). pp. 75–80. (In Russ.).

24. Gordienko D.M., Pavlov E.V., Osipov Yu.N., Ershov V.I., Panfilova E.V. Technical requirements for unmanned aviation systems designed to extinguishing fires in high-rise buildings. *Pozharnaya bezopasnost = Fire Safety*. 2019. № 2. pp. 54–61. (In Russ.).

25. Puzach S.V., Puzach V.G., Doan V.M. To the determination of combustion products toxicity index of inflammable substances and materials indoors. *Pozharovzryvbezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2011. Vol. 20. № 4. pp. 4–13. (In Russ.).

26. Puzach S.V., Suleykin E.V. New theoretical and experimental approach to calculating the spread of toxic gases in case of fire in the room. *Pozharovzryvbezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2016. Vol. 25. № 2. pp. 13–20. (In Russ.). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.02.13-20

27. Puzach S.V., Nguen D.T. Critical times of carbon monoxide effect on a person in case of fire in the room. *Pozharovzryvbezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2016. Vol. 25. № 11. pp. 27–34. (In Russ.). DOI: 10.18322/PVB.2016.25.11.27-34

28. GOST R 12.3.047—2012. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Control methods. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

29. Aseeva R.M., Zaikov G.E. Combustion of polymer materials. Moscow: Nauka, 1981. 280 p. (In Russ.).

30. GOST R 51057—2001. Fire-fighting equipment. Portable fire extinguishers. General technical requirements. Test methods. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200027410> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

31. GOST R 51017—2009. Fire-fighting equipment. Mobile fire extinguishers. General technical requirements. Test methods. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071946> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

32. Poltavets V.A. Errors of flight personnel in accident statistics of civil aircrafts and measures to prevent their recurrence. 6-ya Vseros. nauch. konf. «Chelovecheskiy faktor v aviatsii i kosmonavtike: potentsial i resursy» (Sixth All-Russian Scientific Conference «Human Factor in Aviation and Cosmonautics: Potential and Resources»). Available at: http://www.crown-airforce.narod.ru/aviaprom/Poltavets/errors_norepeat.html (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

33. Dillon B., Singkh Ch. Engineering methods for ensuring systems reliability. Moscow: Mir, 1984. 318 p. (In Russ.).

34. GOST R 27.403—2009. Reliability in technology (SSNT). Test plans for monitoring the likelihood of failure-free operation. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200078695> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

35. Abduragimov I.M. On the mechanisms of fire extinguishing action of fire fighting means. *Pozharovzryvbezopasnost = Fire and Explosion Safety*. 2012. Vol. 21. № 4. pp. 60–82. (In Russ.).

36. Fire load. Reference-book. SITIS-SPN-1. Revision 3. Available at: <https://fireman.club/literature/pozharnaya-nagruzka-spravochnik-redaktsiya-3/> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

37. GOST R EN 1127-1—2009. Explosive atmospheres. Explosion protection and prevention. Part 1. Fundamental concept and methodology. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200075486> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

38. GOST R EN 13463-1—2009 (EN 13463-1—2001). Non-electric equipment for use in potentially explosive atmospheres. Part 1. General requirements. Available at: https://sibcontrols.com/uploaded/pdf/gost_r_en_13463-1-2009.pdf (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

39. SP 9.13130.2009. Fire-fighting equipment. Fire extinguishers. Operating requirements. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071152> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

40. GOST 27331—87. Fire — fighting equipment. Fire classification. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/gost-27331-87> (accessed: January 20, 2020). (In Russ.).

Received February 17, 2020



От редакции

Вниманию авторов!

За публикацию научно-технических статей плата не взимается. Вознаграждение авторам не выплачивается. Электронная версия журнала с опубликованной статьей высылается каждому автору на его e-mail.

Статьи рецензируются. Отрицательные рецензии доводятся до сведения авторов.

Журнал выпускается и в электронной версии.

Особенности формирования ударного фронта на участках поворотов горных выработок



С.В. Черданцев,
д-р техн. наук, гл. науч. сотрудник,
svch01@yandex.ru



П.А. Шлапак,
канд. техн. наук, зав.
лабораторией



К.С. Лебедев,
науч. сотрудник



В.В. Колыхалов,
ст. науч. сотрудник

АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли», Кемерово, Россия

Установлено, что разработку угольных месторождений, особенно на глубоких горизонтах, как правило, сопровождают газодинамические и теплофизические процессы — опасные явления, инициирующие детонационные и ударные волны, которые приводят к особо тяжким авариям. Рассмотрены особенности формирования ударного фронта в газозвушных смесях на участках поворота горных выработок. Построена ударная поляра, с помощью которой определены параметры и выявлены некоторые закономерности газозвушного потока за ударным фронтом.

Ключевые слова: горные выработки, газозвушные смеси, фронт ударной волны, число Маха, критическая скорость, ударная поляра, уравнение Бернулли.

Для цитирования: Черданцев С.В., Шлапак П.А., Лебедев К.С., Колыхалов В.В. Особенности формирования ударного фронта на участках поворотов горных выработок // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 29–35. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-29-35

Введение

Причина газодинамических явлений — внезапные выбросы газа в горные выработки [1], которые могут происходить со сверхзвуковой скоростью [2, 3]. Негативные теплофизические процессы обусловлены наличием пылегазовоздушных смесей (ПГВС), предрасположенных к образованию очагов самонагрева [4], которые приводят к изменению температурного поля горных пород, окружающих очистные выработки [5]. При наличии источников зажигания возникает дефлаграция ПГВС в атмосфере горных выработок, при определенных условиях переходящая в детонацию [6–8].

В публикации [9] сформулирована задача о влиянии теплового поля, обусловленного очагами самонагрева, на течение ПГВС в очистных выработках. Получены выражения, определяющие состояние ПГВС, пересекающей зону подвода теплоты, по изменениям скоростей, давлений, плотностей, температур. В статье [10] рассмотрена задача о вынужденной детонации, сформированной в результате истечения газа из подземного резервуара в горную выработку со сверхзвуковой скоростью. Составле-

ны формулы для скоростей, давлений, плотностей ПГВС на фронте ударной волны и на поверхности Чепмена — Жуге.

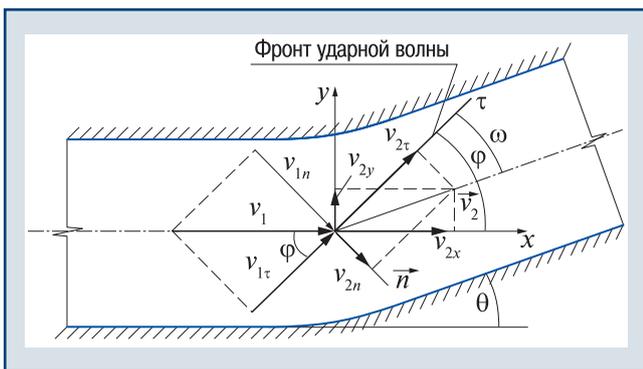
В публикациях [2, 3, 9, 10] приведены результаты исследований и выводы, которые основаны на классической теории ударно-волновых процессов в газах, базирующейся на фундаментальных законах сохранения и гипотезе об идеальности газа [11–13]. При этом принято, что скорость газа нормальна фронту ударной волны, а это справедливо лишь в тех случаях, когда трассы горных выработок прямолинейны.

Однако система выработок на горных предприятиях имеет сложную разветвленную структуру с многочисленными поворотами, ответвлениями и сопряжениями выработок друг с другом. По указанной причине газозвушные потоки движутся не всегда прямолинейно, на криволинейных участках они поворачиваются, а также разветвляются, переходя из одной выработки в другие. В результате существенно изменяется картина формирования ударного фронта, поскольку нормаль к нему не совпадает с направлением скорости газозвушного

потока, как это происходит в прямолинейных горных выработках.

Постановка и решение задачи

Рассмотрим горную выработку, которая в каком-то сечении поворачивается относительно первоначального направления на некоторый угол θ . Предположим, что по горной выработке движется газозвушной поток со сверхзвуковой скоростью v_1 . Пусть при повороте потока она снизилась до величины v_2 , в результате формируется ударный фронт, и вектор нормали \vec{n} к нему не коллинеарен вектору скорости \vec{v}_2 за ударным фронтом. В этом состоит принципиальное отличие от ударного фронта в прямолинейной выработке. При повороте выработки на угол θ ударный фронт поворачивается на угол φ по отношению к ее первоначальной трассе, следовательно, между осью выработки за ее поворотом и ударным фронтом образуется угол ω , определяемый как $\omega = \varphi - \theta$ (рис. 1).



▲ Рис. 1. Параметры газа в косой ударной волне
▲ Fig. 1. Gas parameters in the oblique shock wave

Разложим скорость набегающего потока v_1 на нормаль n к ударному фронту и на ось τ , совпадающую с ударным фронтом, обозначив составляющие скорости соответственно v_{1n} и $v_{1\tau}$. Составляющие скорости v_2 за ударным фронтом на естественные оси n, τ обозначим соответственно $v_{2n}, v_{2\tau}$, а на координатные оси x, y — соответственно v_{2x}, v_{2y} .

Обратим внимание, что тангенциальная компонента скорости газозвушного потока в ударной волне непрерывна, поэтому $v_{1\tau} = v_{2\tau}$. Нормальная же компонента при переходе через ударный фронт уменьшается скачкообразно. Очевидно, что для нормальных компонент скорости верны соотношения (см. рис. 1):

$$v_{1n} = v_1 \sin \varphi;$$

$$v_{2n} = v_{2x} \sin \varphi - v_{2y} \cos \varphi. \quad (1)$$

Соотношения для тангенциальных компонент скорости напишем, исходя из условия их непрерывности $v_{1\tau} = v_{2\tau}$, откуда вытекает равенство:

$$v_1 \cos \varphi = v_{2x} \cos \varphi + v_{2y} \sin \varphi, \quad (2)$$

разделив которое на $\sin \varphi$ и выполнив преобразования, получим:

$$\operatorname{ctg} \varphi (v_1 - v_{2x}) = v_{2y}. \quad (3)$$

Далее воспользуемся формулами для прямого ударного фронта [2, 3]:

$$v_{1n}^2 = \frac{a_1^2}{2k} [k - 1 + \bar{p}_2 (k + 1)];$$

$$v_{2n}^2 = \frac{a_1^2}{2k} \frac{[k + 1 + \bar{p}_2 (k - 1)]^2}{k - 1 + \bar{p}_2 (k + 1)},$$

где a_1, a_2 — местные скорости звука соответственно перед ударным фронтом и за ним; $\bar{p}_2 = p_2/p_1$ (p_2, p_1 — давление соответственно за ударным фронтом и перед ним); k — показатель адиабаты Пуассона.

Поскольку \bar{p}_2 можно определить как [2, 3]

$$\bar{p}_2 = \frac{2k}{k + 1} M_{1n}^2 - \frac{k - 1}{k + 1}, \quad (4)$$

то отношение нормальных составляющих скоростей найдем по формуле:

$$\frac{v_{2n}}{v_{1n}} = \frac{2 + (k - 1) M_{1n}^2}{(k + 1) M_{1n}^2}, \quad (5)$$

где M_{1n} — число Маха перед фронтом ударной волны, вычисляемое по формуле [13]:

$$M_{1n} = v_{1n}/a_1. \quad (6)$$

Подставим формулы (1) в равенство (5) и после достаточно громоздких преобразований найдем $\operatorname{ctg}^2 \varphi$:

$$\operatorname{ctg}^2 \varphi = \frac{-\frac{2a_1^2}{(k + 1)v_1^2} + \frac{v_{2x}}{v_1} - \frac{k - 1}{k + 1}}{\frac{2a_1^2}{(k + 1)v_1^2} + \frac{v_1 - v_{2x}}{v_1}}. \quad (7)$$

С другой стороны, $\operatorname{ctg}^2 \varphi$ можно найти из формулы (3):

$$\operatorname{ctg}^2 \varphi = \frac{v_{2y}^2}{(v_1 - v_{2x})^2}. \quad (8)$$

Сопоставляя равенства (7) и (8), получим выражение

$$v_{2y}^2 = (v_1 - v_{2x})^2 \frac{\frac{2}{k + 1} \left(v_1 - \frac{a_1^2}{v_1} \right) - (v_1 - v_{2x})}{v_1 - v_{2x} + \frac{2}{k + 1} \frac{a_1^2}{v_1}}, \quad (9)$$

устанавливающее связь между составляющими v_{2y} и v_{2x} при условии, что известны v_1 и a_1 .

Вместо a_1 введем в уравнение (9) критическое значение скорости звука $a_{кр}$, которое определим из уравнения [12, 13]:

$$a_1^2 = a_{кр}^2 \frac{k+1}{2} - v_1^2 \frac{k-1}{2},$$

а также по формуле [12]:

$$a_{кр} = \sqrt{\frac{2}{k+1}} a_0,$$

где a_0 — скорость звука в покоящемся газе.

Подставив (10) в (9) и выполнив преобразования, получим уравнение ударной поляры:

$$v_{2y}^2 = (v_1 - v_{2x})^2 \frac{v_{2x}v_1 - a_{кр}^2}{a_{кр}^2 - v_{2x}v_1 + \frac{2v_1^2}{k+1}}. \quad (12)$$

Анализ (12) показывает, что график ударной поляры дважды пересекает ось абсцисс, поскольку $v_{2y} = 0$ в двух случаях: при $v_1 - v_{2x} = 0$ и $v_{2x}v_1 - a_{кр}^2 = 0$. Отсюда с учетом (11) получаем два значения:

$$\begin{aligned} v_{2x} &= v_1; \\ v_{2x} &= \frac{2}{k+1} \frac{a_0^2}{v_1}. \end{aligned} \quad (13)$$

Определим экстремальные значения функции $v_{2y} = f(v_{2x})$, для чего сначала найдем производную dv_{2y}/dv_{2x} . Так как в экстремальных точках она равна нулю, получим уравнение:

$$\frac{-2}{v_1 - v_{2x}} + \frac{v_1}{v_{2x}v_1 - a_{кр}^2} + \frac{v_1}{a_{кр}^2 - v_{2x}v_1 + \frac{2v_1^2}{k+1}} = 0,$$

которое приводится к квадратному уравнению

$$v_{2x}^2 - bv_{2x} + c = 0, \quad (14)$$

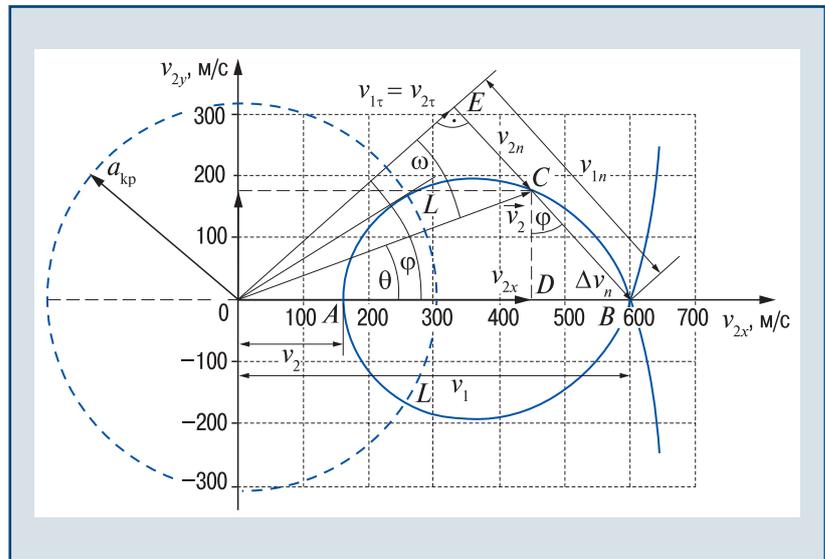
где

$$\begin{aligned} b &= \frac{2a_{кр}^2(k+1) + 3v_1^2}{v_1(k+1)}; \\ c &= \frac{a_{кр}^4(k+1) + 2a_{кр}^2v_1^2 + v_1^4}{v_1^2(k+1)^2}. \end{aligned} \quad (15)$$

Используя уравнение ударной поляры (12) и формулы (14), (15), построим ударную поляру (рис. 2) при следующих исходных данных: $v_1 = 600$ м/с; $a_0 = 340$ м/с; $k = 1,4$; $\theta = 20^\circ$.

Анализ полученных результатов

Согласно рис. 2 точки A и B поляры определяют скорости смеси в прямой ударной волне. При



▲ Рис. 2. Ударная поляра на участке поворота горной выработки на 20°
▲ Fig. 2. Shock polar at the turning section of the mine working by 20°

этом все точки поляры правее точки B соответствуют условиям, при которых $v_2 > v_1$, что физически не реализуется.

Проведем луч из начала координат под углом $\theta = 20^\circ$ до пересечения с ударной полярой в точке C . Очевидно, что вектор OC — это вектор скорости \vec{v}_2 , имеющий проекции на координатные оси v_{2x} , v_{2y} и на естественные оси $v_{2\tau}$, v_{2n} . Измерив длину OC , находим скорость $v_2 = 470,05$ м/с. Из треугольника BCD составляем соотношение:

$$\text{ctg} \angle BCD = \frac{CD}{BD} = \frac{v_{2y}}{v_1 - v_{2x}} = \text{ctg} \varphi, \quad (16)$$

которое совпадает с формулой (8). Замечаем, что в треугольниках BCD и BOE $\angle BCD = \angle BOE$ (как углы с соответственно перпендикулярными сторонами), поэтому на основании формулы (16) $\angle BOE = \varphi$. Измерив этот угол (см. рис. 2), определяющий положение ударного фронта, находим $\varphi = 42^\circ$.

Остальные кинематические параметры за ударным фронтом можно вычислить. Вначале найдем угол $\omega = \varphi - \theta = 22^\circ$. Затем из треугольника OCE определим:

$$v_{2n} = EC = OC \sin \varphi = 176,09 \text{ м/с},$$

а из треугольника OBE получим:

$$OE = OB \cos \varphi = v_1 \cos \varphi = v_{1\tau} = v_{2\tau} = 445,89 \text{ м/с};$$

$$v_{1n} = BE = OB \sin \varphi = 401,48 \text{ м/с};$$

$$\Delta v_n = v_{1n} - v_{2n} = 225,39 \text{ м/с}.$$

Если из начала координат провести касательную к ударной поляре, то точка касания L совпадет с

точкой пересечения ударной поляры с окружностью радиусом $a_{кр}$.

Рассмотрим изменение скорости за ударным фронтом при заданном M_1 и изменении угла θ (см. рис. 2). Если точка C приближается к точке B , то v_{2x} стремится к v_1 . Скачок скорости Δv_n уменьшается, и ударная волна в пределе переходит в слабую ударную волну. Однако при этом φ имеет конечное значение, которое можно определить из (7). Приняв в нем условие $v_1 \rightarrow v_{2x}$, получим равенство:

$$\operatorname{ctg}^2 \varphi + 1 = M_1^2, \quad (17)$$

приводимое к виду:

$$\sin \varphi = 1/M_1,$$

откуда следует, что угол φ — это угол Маха и, как результат, слабая ударная волна — звуковая волна.

При перемещении точки C к точке A скорость v_2 уменьшается и после прохождения точки L становится дозвуковой. При этом φ монотонно увеличивается и в точке A становится равным 90° , что соответствует прямой ударной волне. Из уравнения (9) при $v_{2x} \rightarrow v_2$ следует соотношение между скоростями:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{2 + (k-1)M_1^2}{(k+1)M_1^2}, \quad (18)$$

справедливое для прямой ударной волны [2].

Из рис. 2 видно, что если φ при перемещении точки C к точке A растет монотонно, то θ достигает максимального значения в точке L , когда v_2 за ударным фронтом равна критической скорости звука $a_{кр}$, после чего вновь начинает убывать. Таким образом, точка L делит ударную поляру на две части: BL , для которой $v_2 > a_{кр}$, и LA , где $v_2 < a_{кр}$. Причем, как отмечалось ранее, через точку L проходит касательная, проведенная к поляре из начала координат. В итоге для точек поляры на участке LA скорость газа после ударной волны становится дозвуковой, а для точек на участке BL скорость газа v_2 , прошедшего ударную волну, остается сверхзвуковой, и в нем могут возникнуть новые ударные волны.

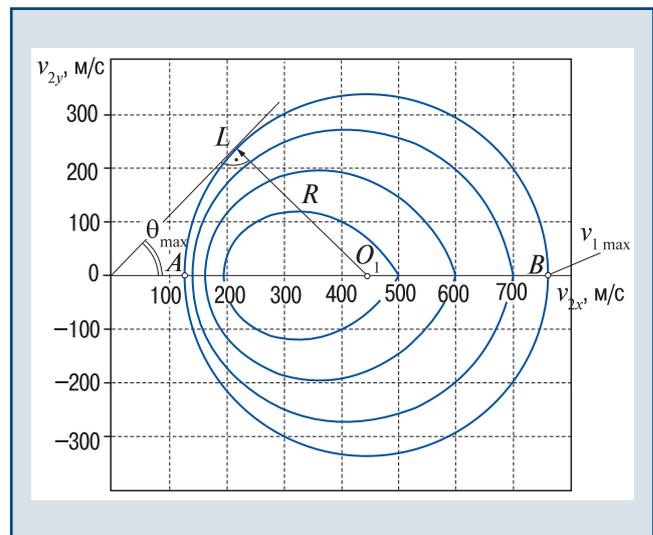
При увеличении скорости набегающего потока v_1 точка B перемещается вправо, а точка A , наоборот, влево. Поэтому ударные поляры для меньших v_1 будут лежать внутри ударных поляр, построенных при больших скоростях v_1 (рис. 3).

Приняв $v_1 = a_{кр}$ в уравнении Бернулли для идеального газа [11–13]

$$v_1^2 + \frac{2}{k-1} a^2 = v_{1\max}^2,$$

найдем максимально возможную скорость набегающего потока:

$$v_{1\max} = \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} a_{кр} \quad (19)$$



▲ Рис. 3. Ударные поляры при различных скоростях набегающего потока

▲ Fig. 3. Shock polar at various speeds of the incoming flow

и, подставив найденную скорость в уравнение ударной поляры (12), после преобразования получим уравнение:

$$v_{2y}^2 = \left(a_{кр} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - v_{2x} \right) \left(v_{2x} - a_{кр} \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \right), \quad (20)$$

которое приведем к каноническому уравнению окружности:

$$(v_{2x} - x_0)^2 + (v_{2y} - y_0)^2 = R^2, \quad (21)$$

где:

$$x_0 = \frac{1}{2} a_{кр} \left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} + \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \right);$$

$$y_0 = 0;$$

$$R = \frac{1}{2} a_{кр} \left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - \sqrt{\frac{k-1}{k+1}} \right).$$

Абсциссы в точках A и B найдем из выражений:

$$v_{2xA} = x_0 - R = a_{кр} \sqrt{\frac{k-1}{k+1}};$$

$$v_{2xB} = x_0 + R = a_{кр} \sqrt{\frac{k+1}{k-1}}.$$

Центр окружности расположен в точке O_1 (см. рис. 3) с координатами x_0, y_0 , а касательная, проведенная к окружности из начала координат, имеет угол с осью v_{2x} , вычисляемый по формуле:

$$\sin \theta_{\max} = R/(R + 0A) = 1/k.$$

По определению θ_{\max} — максимально возможный угол поворота потока в ударной волне, достигаемый только при бесконечно большом числе Маха в набегающем потоке. Для воздуха показатель адиабаты Пуассона $k = 1,4$, следовательно, $\sin \theta_{\max} = 1/1,4$, отсюда $\theta_{\max} \approx 45^\circ$. Таким образом, воздушный поток, прошедший ударную волну, не может повернуть на угол θ , превышающий 45° .

Пусть заданы величины v_1 и M_1 , а также угол θ поворота выработки, вдоль поверхности которой должен повернуть газозвушной поток (см. рис. 1). Положение фронта ударной волны и кинематические параметры потока за фронтом можно определить с помощью ударной поляры (см. рис. 2). Для определения соотношения p_2 и p_1 в ударной волне воспользуемся формулой (4). Подставив в нее (1) и (6), найдем:

$$\bar{p}_2 = \frac{2k}{k+1} M_1^2 \sin^2 \varphi - \frac{k-1}{k+1}. \quad (22)$$

Далее с помощью (22) вычислим соотношения температур газа [14]:

$$\bar{T}_2 = \bar{p}_2 \frac{k+1 + \bar{p}_2(k-1)}{k-1 + \bar{p}_2(k+1)} \quad (23)$$

и его плотностей

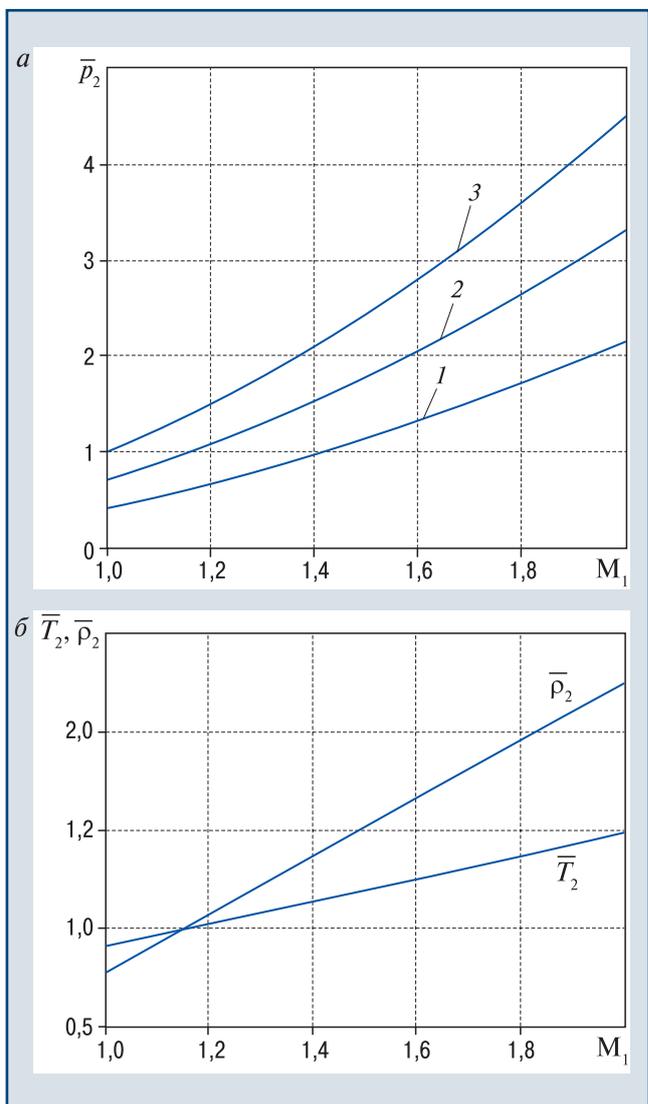
$$\bar{\rho}_2 = \frac{\bar{p}_2}{\bar{T}_2}, \quad (24)$$

где $\bar{T}_2, \bar{\rho}_2$ — относительные значения соответственно температуры и плотности газозвушной смеси за ударным фронтом, $\bar{T}_2 = T_2/T_1, \bar{\rho}_2 = \rho_2/\rho_1$.

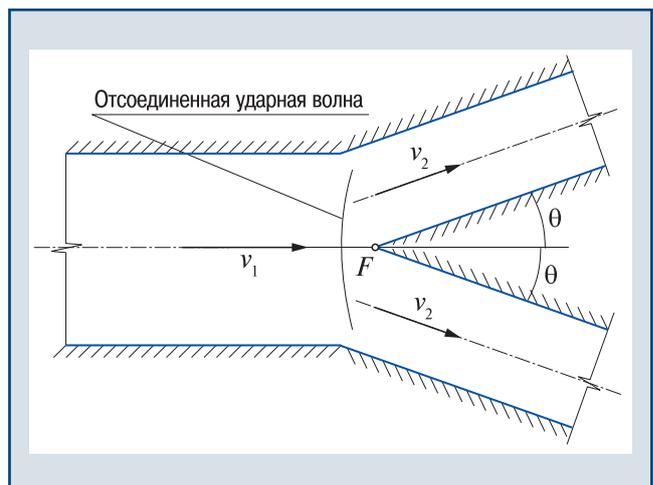
С помощью формул (22)–(24) построим графики давления $\bar{p}_2(M_1)$, температуры $\bar{T}_2(M_1)$ и плотности $\bar{\rho}_2(M_1)$ (рис. 4). По ним видно, что при любом фиксированном M_1 давление в ударной волне при повороте выработки всегда меньше давления в ударной волне на прямолинейном участке (см. рис. 4, а, здесь 1 — при $\varphi = 45^\circ$; 2 — при $\varphi = 60^\circ$; 3 — при $\varphi = 90^\circ$). Очевидно, что меньшими будут также температура и плотность. С увеличением M_1 давление, температура и плотность монотонно увеличиваются, при этом графики $\bar{p}_2(M_1)$ имеют форму вогнутых кривых (см. рис. 4, а), а графики $\bar{T}_2(M_1), \bar{\rho}_2(M_1)$ — практически прямые линии (см. рис. 4, б).

Если при заданном M_1 увеличить угол раствора клина 2θ , то может оказаться, что прямая, проведенная из начала координат под углом θ , не пересекается с ударной полярой, построенной для данного M_1 . В этом случае перед точкой F клина образуется отсоединенная ударная волна (рис. 5).

Если увеличить M_1 , то состояние газа за ударной волной будет изображаться ударной полярой, соответствующей $M_{1(1)} > M_1$. С ней может пересечься прямая, проведенная под углом θ , т.е. ударная волна снова окажется «посаженной» на носик клина в точке F .



▲ Рис. 4. Зависимости давления, температуры и плотности от числа Маха в набегающем потоке
▲ Fig. 4. Dependences of pressure, temperature, and density on the Mach number in the incoming flow



▲ Рис. 5. Отсоединенная ударная волна на сопряжении горных выработок
▲ Fig. 5. Detached shock wave at the junction of the mate mine workings

Если же при заданном $M_{1(i)}$ вновь увеличить 2θ , то возникнет вероятность, что прямая, проведенная под новым углом θ , не пересечется с ударной полярной $M_{1(i)}$. В этом случае косая ударная волна отойдет от точки F , т.е. образуется отсоединенная ударная волна. По-видимому, подобная логика рассуждений справедлива до тех пор, пока угол раствора клина не достигнет максимального значения $\sin\theta_{\max} = 1/k$. Для клина, имеющего угол раствора $\theta > \theta_{\max}$, даже при бесконечном большом M_1 ударная волна будет отсоединенной. Для воздуха $\theta_{\max} \approx 45^\circ$. При $2\theta > 90^\circ$ ударная волна всегда отсоединенная.

Заключение

Сформулирована задача о формировании ударного фронта на участке поворота горной выработки. Для конкретных параметров газозвушной смеси при повороте выработки на угол 20° построена ударная полярная, с помощью которой найдены газодинамические и теплофизические параметры смеси. Выявлено, что при любом фиксированном числе Маха давление, плотность и температура за ударным фронтом при повороте выработки всегда меньше аналогичных характеристик за ударным фронтом на прямолинейном участке. С увеличением числа Маха давление, температура и плотность монотонно увеличиваются, при этом графики давления имеют форму вогнутых кривых, а графики температуры и плотности — практически прямые линии. Отмечены условия образования отсоединенной ударной волны на острие клина в сопряжении горных выработок.

Список литературы

1. *Большинский М.И., Лыиков Б.А., Каплюхин А.А.* Газодинамические явления в шахтах. — Севастополь: Вебер, 2003. — 284 с.
2. *Об одном подходе к описанию суфлярных выделений газа из резервуаров угольного массива в горные выработки/ Н.В. Черданцев, С.В. Черданцев, Хи Ун Ли и др.*// Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 3. — С. 45–52. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-3-45-52
3. *Определение параметров суфлярных выделений газа из угольного пласта в горные выработки/ С.В. Черданцев, Н.В. Черданцев, Хи Ун Ли и др.*// Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2017. — № 1. — С. 26–33.
4. *Initiation of underground fire sources/ V.N. Oparin, T.A. Kiryaeva, V.Yu. Gavrilo et al.*// Journal of Mining Science. — 2016. — Vol. 52. — Iss. 3. — P. 576–592.
5. *Chanyshev A.I.* A method to determine a body's thermal state// Journal of Mining Science. — 2012. — Vol. 48. — Iss. 4. — P. 660–668.
6. *Amelchugov S.P., Bykov V.I., Tsybenova S.B.* Spontaneous Combustion of Brown-Coal Dust. Experiment, Determination of Kinetic Parameters, and Numerical Modeling// Combustion, Explosion and Shock Waves. — 2002. — Vol. 38. — Iss. 3. — P. 295–300.
7. *Васильев А.А., Васильев В.А.* Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе

метана и угольной пыли// Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. — 2016. — № 2. — С. 8–39.

8. *Kurlenya M.V., Skritsky V.A.* Methane Explosions and Causes of Their Origin in Highly Productive Sections of Coal Mines// Journal of Mining Science. — 2017. — Vol. 53. — Iss. 5. — P. 861–867.

9. *Черданцев С.В., Шлапаков П.А.* Анализ состояния пылегазовоздушных смесей в атмосфере горных выработок вблизи очагов самонагревания// Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 9. — С. 15–21. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-15-21

10. *Формирование детонационного процесса при внезапном выбросе газа в горную выработку со сверхзвуковой скоростью/ С.В. Черданцев, П.А. Шлапаков, К.С. Лебедев, В.В. Колыхалов*// Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 7. — С. 62–73. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-62-73

11. *Овсянников Л.В.* Лекции по основам газовой динамики. — М.—Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003. — 336 с.

12. *Газовая динамика/ Х.А. Рахматуллин, А.Я. Сагомоян, А.И. Бунимович, Н.Н. Зверев.* — М.: Высшая школа, 1965. — 723 с.

13. *Станюкович К.П.* Неустановившиеся движения сплошной среды. — М.: Наука, 1971. — 856 с.

14. *Кутателадзе С.С.* Основы теории теплообмена. — М.: Атомиздат, 1979. — 416 с.

svch01@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 9 января 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 29–35.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-29-35

Specifics of the Shock Front Formation at the Sections of Turns of the Mine Workings

S.V. Cherdantsev, Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, svch01@yandex.ru

P.A. Shlapakov, Cand. Sci. (Eng.), Laboratory Head

K.S. Lebedev, Research Associate

V.V. Kolykhalov, Senior Research Assistant

АО «Scientific Research Center VostNII on Safety of Work in the Mining Industry», Kemerovo, Russia

Abstract

It is established that the development of coal deposits, especially on deep horizons, is usually accompanied by gas-dynamic and thermophysical processes. These are dangerous phenomena that initiate detonation and shock waves, which lead to especially serious accidents. The system of workings at the mining enterprises has a complicated branched structure with numerous turns, branches and junctions. Gas-air flows do not always move in a straight line, at the curved sections they turn around, and, also branch out, moving from one working to another. As a result, the process of the shock front formation changes significantly, since the normal line to it does not coincide with the direction of the

gas-air flow velocity, as it takes place in the straight mine workings. The specific features of the shock front formation in the gas-air mixtures at the sections of the mine workings turns are considered in the article. For specific parameters of the gas-air mixture, when the working is turning to the preset angle, the shock polar is built. With its help, the gas-dynamic and thermophysical characteristics are determined, and some regularities of the gas-air flow movement behind the shock front are identified. It is determined that at any fixed Mach number, the pressure, density and temperature behind the shock front when the working is turning is always less than the similar characteristics behind the shock front at the straight section. With an increase in the Mach number, the pressure, temperature, and density are increasing monotonously, moreover, the pressure plots are in the form of the concave curves, and the plots of temperature and density are almost straight lines. The conditions for the formation of the detached shock wave at the edge of the wedge in the mine workings junctions are noted.

Key words: mine workings, gas-air mixtures, shock front, Mach number, critical speed, shock polar, Bernoulli equation.

References

1. Bolshinskiy M.I., Lysikov B.A., Kaplyukhin A.A. Gas-dynamic phenomena in the mines. Sevastopol: Veber, 2003. 284 p. (In Russ.).
2. Cherdantsev N.V., Cherdantsev S.V., Lee Khi Un, Filatov Yu.M., Shlapakov P.A., Lebedev K.S. About One Approach to the Description of Blow of Methane from the Coal Massif to the Mine Workings. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2017. № 3. pp. 45–52. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2017-3-45-52
3. Cherdantsev S.V., Cherdantsev N.V., Li Khi Un, Lebedev K.S., Lee K.H., Khaylin S.A. Determination of gas blowing emission parameters from coal massif into mine openings. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti = Industrial Safety*. 2017. № 1. pp. 26–33. (In Russ.).
4. Oparin V.N., Kiryaeva T.A., Gavrilov V.Yu., Tanashev Yu.Yu., Bolotov V.A. Initiation of underground fire sources. *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. Iss. 3. pp. 576–592.

5. Chanyshv A.I. A method to determine a body's thermal state. *Journal of Mining Science*. 2012. Vol. 48. Iss. 4. pp. 660–668.
6. Amelchugov S.P., Bykov V.I., Tsybenova S.B. Spontaneous Combustion of Brown-Coal Dust. Experiment, Determination of Kinetic Parameters, and Numerical Modeling. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2002. Vol. 38. Iss. 3. pp. 295–300.
7. Vasilev A.A., Vasilev V.A. Calculated and experimental parameters of combustion and detonation mixtures based on methane and coal dust. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti = Industrial Safety*. 2016. № 2. pp. 8–39. (In Russ.).
8. Kurlenya M.V., Skritsky V.A. Methane Explosions and Causes of Their Origin in Highly Productive Sections of Coal Mines. *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53. Iss. 5. pp. 861–867.
9. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A. Analysis of the State of Dust-Gas-Air Mixtures in the Atmosphere of Mine Workings in the Vicinity of Spontaneous Heating Points. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2019. № 9. pp. 15–21. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2019-9-15-21
10. Cherdantsev S.V., Shlapakov P.A., Lebedev K.S., Kolykhalov V.V. Creation of detonation process during gas outburst in roadway at supersonic speed. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten = Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2019. № 7. pp. 62–73. (In Russ.). DOI: 10.25018/0236-1493-2019-07-0-62-73
11. Ovsyannikov L.V. Lectures on the basics of gas dynamics. Moscow–Izhevsk: Institut kompyuternykh issledovaniy, 2003. 336 p. (In Russ.).
12. Rakhmatullin Kh.A., Sagomonyan A.Ya., Bunimovich A.I., Zverev N.N. Gas dynamics. Moscow: Vysshaya shkola, 1965. 723 p. (In Russ.).
13. Stanyukovich K.P. Unsteady motion of the continuous medium. Moscow: Nauka, 1971. 856 p. (In Russ.).
14. Kutateladze S.S. Fundamentals of heat transfer theory. Moscow: Atomizdat, 1979. 416 p. (In Russ.).

Received January 9, 2020

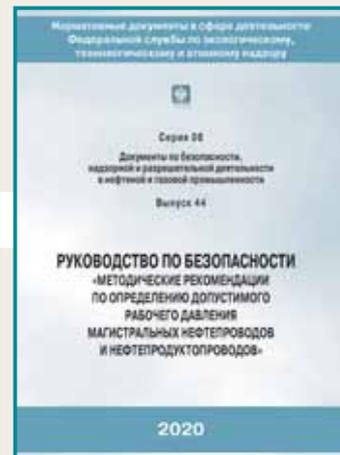


Нормативные документы и периодические издания Ростехнадзора можно заказать по интернету.

**Интернет-магазин
shop.safety.ru**

Будем рады сотрудничеству!

По всем вопросам обращайтесь:
тел/факсы: +7 (495) 620-47-53.
E-mail: shop@safety.ru



О некоторых различиях в методических подходах при моделировании параметров волн давления от сгорания и детонации облаков топливно-воздушных смесей



А.А. Агапов,
канд. техн. наук, директор
расчетно-аналитического центра,
inform@safety.ru

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия



В.С. Сафонов,
д-р техн. наук, гл.
науч. сотрудник

ООО «Газпром ВНИИГАЗ»,
Москва, Россия



С.И. Сумской,
канд. техн. наук, вед. науч.
сотрудник

НИЯУ МИФИ, Москва, Россия



А.А. Швыряев,
канд. техн. наук, вед. науч.
сотрудник

МГУ им. М.В. Ломоносова,
Москва, Россия

Обсуждаются особенности математической модели взрыва топливно-воздушной смеси, приведенной в Методике определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах, которые приводят к завышению как размеров зон действия опасных факторов, так и показателей риска.

Ключевые слова: взрыв облака, топливно-воздушная смесь, пожарный риск, риск аварий, дефлаграция, детонация, методика.

Для цитирования: Агапов А.А., Сафонов В.С., Сумской С.И., Швыряев А.А. О некоторых различиях в методических подходах при моделировании параметров волн давления от сгорания и детонации облаков топливно-воздушных смесей // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 36–42. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-36-42

Некоторые физические аспекты горения и детонации облаков топливно-воздушных смесей

При авариях с выбросом углеводородов в окружающую среду в воздухе возможно образование топливно-воздушных смесей (ТВС), которые при наличии источника зажигания способны к воспламенению и последующему выделению энергии. Такое энерговыделение возможно в двух режимах: в дозвуковом (горение или дефлаграция) и в сверхзвуковом (детонация). При этом горение может проходить в турбулентном режиме, тогда видимая скорость горения может наблюдаться в довольно широком диапазоне (до нескольких сотен метров в секунду).

В обоих случаях (и при горении, и при детонации) в воздухе формируются волны давления. Однако характеристики этих волн существенно отличаются. При детонации в воздухе возникает воздушная ударная волна (ВУВ), т.е. волна с резким скачком давления на фронте. При горении же в воздухе формируется волна сжатия, характеризующаяся не

скачкообразным, а постепенным нарастанием давления. Такое различие обусловлено тем, что ВУВ формируется в воздухе в момент выхода детонации на границу облака ТВС (в этот момент внутри облака ТВС имеется высокое давление, а продукты детонации движутся с высокой скоростью), поэтому ВУВ распространяется уже после окончания энерговыделения. Воздушная волна сжатия формируется в процессе распространения фронта горения, поэтому к моменту окончания горения облака в воздухе уже идет волна сжатия с постепенно нарастающим давлением.

Для детонации любой ТВС существует единственный стационарный режим распространения с высокой скоростью (около 1,8 км/с) и с высоким давлением на фронте (примерно 18 атм) [1, 2]. Для горения же такая уникальность режима распространения существует только при ламинарном горении, когда фронт остается гладким (плоским, сферическим). В этом случае скорость горения определяется «медленными» процессами тепло- и массопередачи

на молекулярном уровне. Скорость же распространения пламени при этом крайне невысока и составляет около нескольких десятков сантиметров в секунду. Однако из-за внешних причин фронт пламени при горении может сильно искривляться, в результате площадь его поверхности может существенно возрастать, что ведет к увеличению объемной скорости выгорания ТВС, а значит, к более быстрому перемещению зоны энерговыделения в пространстве. Такое горение в существенно искривленном фронте называется турбулентным. В отличие от ламинарного горения турбулентное может протекать с различными скоростями распространения зоны энерговыделения (вплоть до отмеченных выше нескольких сотен метров в секунду). Скорость турбулентного горения в этом случае будет зависеть от степени деформированности (турбулизованности) пламени. Более турбулизованное пламя распространяется с большей скоростью. В свою очередь большая турбулизация достигается в пространствах, где существуют большие условия для увеличения поверхности пламени вследствие его деформации (искривления, «сморщивания», образование складок). Одним из факторов, способствующих деформации пламени (и, как следствие, возрастанию площади его поверхности), является наличие препятствий на его пути (загромождения): пламя, в своем движении огибая препятствия, растягивается и увеличивает поверхность. Пример действия загромождения — так называемая спираль Шелкина, размещение которой на пути пламени приводит к существенному ускорению пламени [3]. Таким образом, как правило, чем сильнее загромождение, тем выше скорость турбулентного горения.

Как отмечалось, детонационная волна изначально характеризуется высоким давлением горячих сжатых продуктов, и это высокое давление приводит к возникновению ВУВ. На фронте же горения (в том числе турбулентного) давление не повышается [4]. Соответственно, формирование волны давления перед фронтом обусловлено другим механизмом. Волна давления перед фронтом горения образуется вследствие невозможности оттока нагретых продуктов от фронта горения. Хорошо известен следующий факт: при зажигании пламени в трубе от открытого торца барические волны в трубе практически не возникают, и лишь при зажигании от закрытого торца перед фронтом формируется волна сжатия. Именно невозможность оттока нагретых низкоплотных продуктов от фронта пламени заставляет их расширяться в направлении движения зоны горения, тем самым «навязывая» фронту горения роль своеобразного поршня, расталкивающего газ перед зоной горения и формирующего волны сжатия перед ней. Именно увеличение объема вещества при горении (в силу незначительного изменения давления и существенного роста температуры) и вызывает расширение продуктов горения уже в процессе го-

рения, что и приводит к появлению волн сжатия перед фронтом [4].

При сферическом пламени, которое обычно и реализуется с теми или иными допущениями на практике, условия для свободного оттока продуктов отсутствуют, что и приводит к формированию волн сжатия перед фронтом.

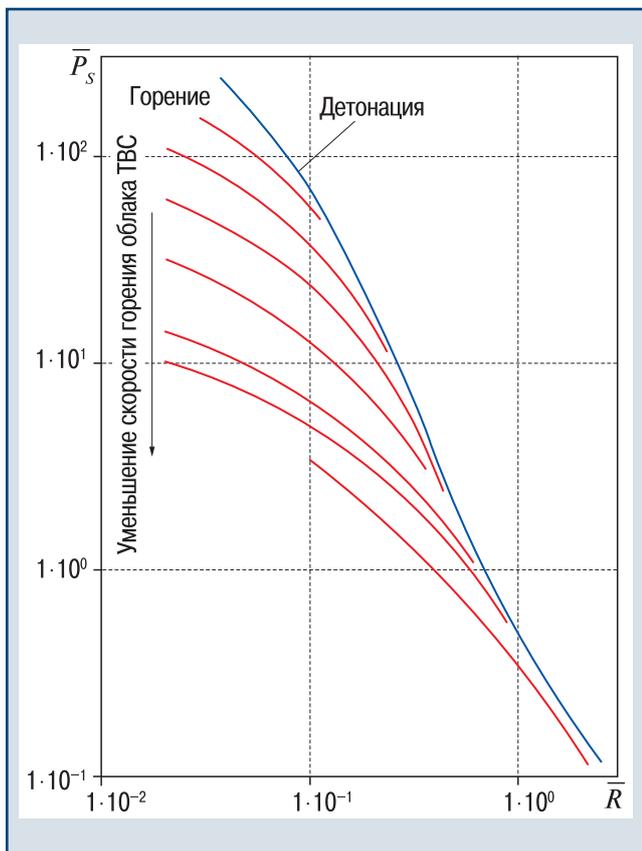
В связи со столь разными механизмами формирования волн давления при горении и детонации возникают вопросы: насколько могут быть опасны дефлаграционные режимы горения по сравнению с детонацией, могут ли при дефлаграции возникать более интенсивные волны давления, чем при детонации?

По нашему мнению, ответ на этот вопрос однозначен: на одинаковых расстояниях в случае одной и той же ТВС последствия барического воздействия от детонации гораздо более опасны, чем последствия от дефлаграционного режима сгорания опасного вещества. Это суждение базируется на основных положениях газодинамики процессов горения и подтверждается опытами, например [5], и непосредственным прямым численным газодинамическим расчетом [6].

Действительно, при выделении одного и того же количества энергии волна давления тем мощнее, чем быстрее происходит энерговыделение. То есть чем быстрее распространяется фронт энерговыделения, тем мощнее волна на одинаковом удалении от места энерговыделения. Это объясняется тем, что при медленных скоростях энерговыделения выделившееся за большее время заданное количество энергии успеет распределиться на большей области пространства, поскольку за большее время волны давления убегают дальше от места горения (детонации). Соответственно, при детонации, как самом быстром способе выделить энергию, получаются самые мощные волны давления. С другой стороны, чем мощнее распространяющаяся волна давления в воздухе, тем сильнее с расстоянием будет эта волна затухать.

Наконец, на больших расстояниях, где время энерговыделения заметно меньше времени прихода волны, разница между давлениями в волнах, возникающими при разных скоростях горения, будет уменьшаться.

Исходя из этих соображений, можно ожидать, что зависимости избыточного давления в волнах от расстояния качественно будут иметь вид, аналогичный приведенному на рис. 1 (здесь \bar{P}_s — безразмерное давление на фронте волны давления; R — безразмерное расстояние). Кривые зависимости давления от расстояния будут соответствовать тем большей скорости энерговыделения, чем выше они лежат на рис. 1. Наклон этих зависимостей тем меньше, чем меньше скорость горения. То есть чем медленнее идет горение, тем меньше давление в волне, но больше протяженность фазы сжатия, что и способствует более медленному затуханию таких волн. Самой



▲ Рис. 1. Качественный вид зависимостей безразмерного давления от безразмерного расстояния при различных скоростях энерговыделения (горение или детонация сферического облака топливно-воздушных смесей)

▲ Fig. 1. Qualitative view of the dependences of dimensionless pressure on dimensionless distance at various energy release rates (combustion or detonation of the fuel-air mixtures cloud)

верхней зависимостью на рис. 1 является кривая для детонации, а все лежащие под ней линии будут стремиться к ней на больших расстояниях. Причем, чем выше скорость горения, тем быстрее происходит асимптотическое сближение.

Именно такие закономерности традиционно лежат в основе методических подходов к оценке последствий при воспламенении облаков ТВС. Сами же эти подходы могут основываться как на экспериментальных данных, так и на данных расчетов. Последние могут выполняться либо по детальным численным моделям (двух- или трехмерным), либо по упрощенным параметрическим зависимостям. Параметрические зависимости широко распространены в силу простоты и быстроты получения результатов. В качестве примеров реализации таких подходов можно привести параметрические зависимости для оценки волн давления [7–16]. Во всех случаях рассматриваются одномерные задачи о горении (детонации) сферического облака из центра. Конечно, это упрощенная постановка, однако она позволяет получить определенное представление

о реальной картине параметров ударной волны и, главное, провести сравнение различных ситуаций, исходя из пусть упрощенных, но единых принципов.

Очевидно, что в математических моделях распространения ударных волн должны реализовываться все общепризнанные принципы теории горения и взрыва, в том числе упомянутые выше.

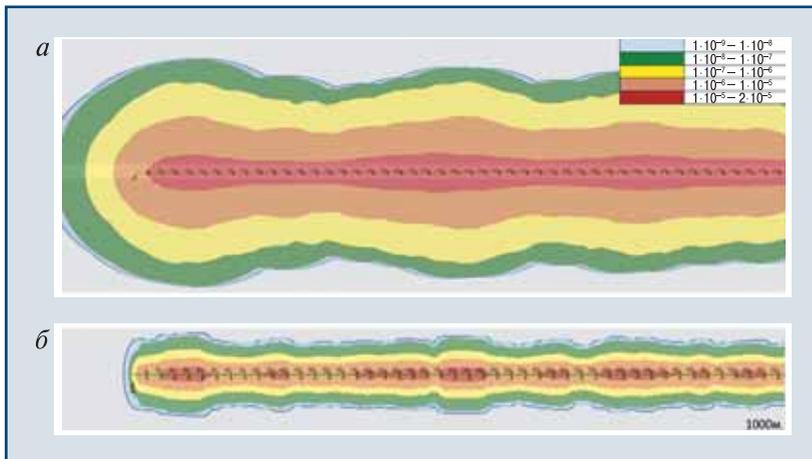
Сравнение подходов к оценке параметров ударных волн и волн сжатия в методиках МЧС России и Ростехнадзора

В России для оценки пожарного риска и риска аварий в части учета последствий взрыва облаков ТВС в настоящее время используются две основные методики — [7] и [9], реализующие подходы МЧС России и Ростехнадзора соответственно. Отметим, что методика [9] является развитием документа РД 03-409—01 [8], утвержденного Ростехнадзором еще в 2001 г. В основе [7] и [9] лежат общие методические подходы, разработанные д-ром физ.-мат. наук Б.Е. Гельфандом [1, 2], и одни и те же соотношения, поэтому, казалось бы, результаты расчета по ним должны хорошо согласовываться. Однако это согласование не всегда достигается.

Рассмотрим следующий пример. При расчете по методике [7] для волны давления, возникающей, например, при взрыве облака пропановоздушной смеси с взрывоопасной массой 3 т (при стехиометрической концентрации), образующейся при выбросе из трубопровода, транспортирующего нестабильную смесь сжиженных легких углеводородов (так называемую широкую фракцию легких углеводородов (ШФЛУ)), на 613 м ($R_x = 4,38$) от центра взрыва, давление на фронте волны для класса II по степени загроможденности окружающего пространства (сильнозагроможденное, режим дефлаграции) составит 33,7 кПа, а для класса I по степени загроможденности, при котором, согласно [7], реализуется детонация, — всего 5 кПа. Для обратной задачи определения расстояния, на котором достигается давление 5 кПа ($P_x = 0,049$), расчетные значения расстояний для режима дефлаграции и детонации составят 4,28 км ($R_x = 31$) и 613 м ($R_x = 4,38$) соответственно. В результате получаем ситуацию, когда при расчетах по методике [7] последствия от реализации режима детонации зоны поражения оказываются в 7 раз менее опасными по протяженности и почти в 50 раз по площади, чем для режима дефлаграционного горения.

Если воспользоваться такими результатами расчета для оценки показателей риска, то возникают anomalously большие площади с неправдоподобно завышенными показателями риска. На рис. 2 приведены результаты расчета поля потенциального риска на начальном участке трубопровода с ШФЛУ для двух вариантов сгорания облаков: высокоскоростной дефлаграции (рис. 2, а) и детонации (рис. 2, б). Разница реализуется в чрезвычайно больших диспропорциях. Для режима дефлаграции (рис. 2, а) расстояние, на котором потенциальный пожарный риск достигает

значения $1 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹, составляет более 4 км, а для режима детонации (см. рис. 2, б) — около 1 км.



▲ Рис. 2. Результаты расчета поля потенциального риска для участка трубопровода DN400 с широкой фракцией легких углеводородов
▲ Fig. 2. The results of calculating the field of potential risk for DN400 pipeline section with a wide fraction of light hydrocarbons

Такие результаты позволяют появляться различным оценкам размеров зон повышенной опасности. Например, в случае прогнозирования на объекте возникновения дефлаграционных режимов горения (в процессе развития аварийной ситуации) можно для «сокращения» размеров зон действия опасных факторов в качестве исходных данных просто «консервативно» указать максимальный (наиболее опасный) уровень загроможденности окружающего пространства для формально возможной¹ реализации условий детонации. И тогда по методике [7] повышение консервативности в оценке последствий аварийной ситуации (рассмотрение детонации вместо дефлаграции) даст существенное уменьшение размеров зон поражения².

Причины расхождения результатов расчетов по методикам МЧС России и Ростехнадзора

Причина таких существенных расхождений результатов связана прежде всего с особенностями алгоритма расчета параметров волны давления при взрыве облака ТВС, приведенного в методике [7].

В методику [7] в том виде, в котором она опубликована в настоящее время, по сравнению с [9] внесен ряд изменений. В частности, при описании процесса дефлаграционного горения исключен абзац, который в документе Ростехнадзора [9] изложен так:

¹ Отметим, что реализация сценария с детонацией облака ТВС применительно к типовым производственным объектам (а тем более на объектах магистрального трубопроводного транспорта), согласно многочисленным исследованиям и статистике аварийности, крайне маловероятна.

² При этом полученные зоны будут более корректны с точки зрения физики моделируемого процесса и коррелироваться с результатами расчетов по [9].

«25. Далее вычисляются величины P_{x2} и I_{x2} , которые соответствуют режиму детонации и для случая детонации газовой смеси рассчитываются по соотношениям (6), (7). Окончательные значения P_x и I_x выбираются из условий:

$$P_x = \min(P_{x1}, P_{x2});$$

$$I_x = \min(I_{x1}, I_{x2}).»$$

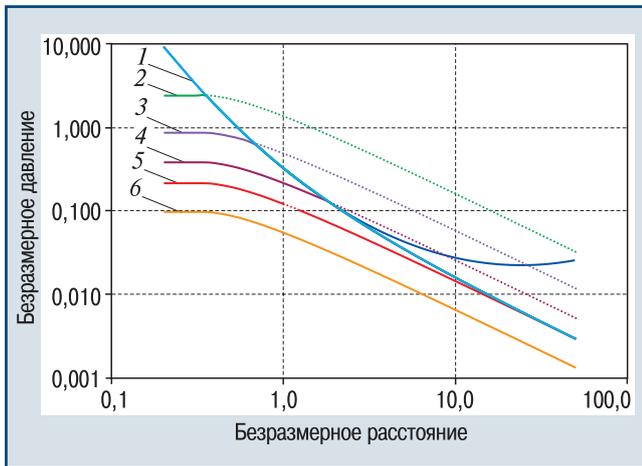
Смысл абзаца в том, что если рассчитанные для соответствующих значений безразмерного расстояния R_x значения безразмерного давления P_{x1} и импульса I_{x1} на фронте волны давления для дефлаграционного режима горения оказываются больше, чем эти же значения для режима детонации, то в качестве расчетных значений давления P_x и импульса I_x нужно принимать давление и импульс для режима детонации (P_{x2} и I_{x2}).

Появление этого требования в [9] обусловлено тем, что, как отмечено выше, каждой скорости горения соответствует своя кривая зависимости давления от времени (со своим наклоном), и этот наклон варьируется от крутого (детонация затухает быстро) до плоского (низкие скорости горения дают волны с медленным затуханием) при общей асимптотике на больших расстояниях (см. рис. 1).

Но при аппроксимации этих зависимостей давления от расстояния в целях упрощения записи обычно выбирают кривую аппроксимации с одним наклоном, а разность в скорости горения учитывают путем смещения по вертикали. Это иллюстрируется на рис. 3 (здесь 1 — детонация; 2, 3, 4, 5, 6 — дефлаграция со скоростью фронта пламени соответственно 500; 300; 200; 150; 100 м/с), где приведены общие для [7] и [9] зависимости давления от расстояния. Такой подход реализуется не только в [7–9], но и в упомянутых выше зарубежных методиках.

Но при аппроксимации этих зависимостей давления от расстояния в целях упрощения записи обычно выбирают кривую аппроксимации с одним наклоном, а разность в скорости горения учитывают путем смещения по вертикали. Это иллюстрируется на рис. 3 (здесь 1 — детонация; 2, 3, 4, 5, 6 — дефлаграция со скоростью фронта пламени соответственно 500; 300; 200; 150; 100 м/с), где приведены общие для [7] и [9] зависимости давления от расстояния. Такой подход реализуется не только в [7–9], но и в упомянутых выше зарубежных методиках.

На рис. 3 также представлена зависимость давления от расстояния для детонации. Пунктиром показаны участки этих кривых для режима дефлаграции, лежащие выше кривой детонации, которые исключаются процитированным выше и непопавшим в методику [7] абзацем методики [9], а ранее [8]. Понятно, что при более точной (хотя и более громоздкой) аппроксимации, например по типу качественно показанных на рис. 1 зависимостей, кривые горения на рис. 3 не должны были бы подниматься выше линии для детонации, а сам характер спада давления по ним был бы больше, чем это показано на рис. 3. Это означает, что более точные кривые (по типу рис. 1), аппроксимирующие давление для различных скоростей горения, всегда лежали бы ниже и кривой для соответству-



▲ Рис. 3. Зависимости безразмерного давления от безразмерного расстояния для различных режимов сгорания облака топливно-воздушных смесей
▲ Fig. 3. Dependences of dimensionless pressure on dimensionless distance for various modes of combustion of the fuel-air mixtures cloud

ющей скорости горения (по типу аппроксимации, отображенному на рис. 3), и кривой для детонации. Именно для соблюдения этого и вводится в [9] ограничение детонационной кривой части зависимостей для горения. Фактически этот своеобразный математический прием позволяет учесть разный наклон зависимостей давления от расстояния при разных скоростях горения, неучтенный в аппроксимационных кривых для давления при горении. При этом учитывается тот факт, что на больших расстояниях энерговыделение при разных режимах и скоростях дает одно и то же избыточное давление, зависящее только от количества выделившейся энергии и все меньше зависящее от времени выделения этой энергии, т.е. скорости горения.

В результате получается простой двухкусочный спад давления, выраженный приведенными выше соотношениями: часть — по кривой для горения, часть — по кривой для детонации. Понятно, что такой подход несколько завышает истинные давления, возникающие при горении, но вполне приемлем для целей использования методики.

Следует отметить, что и в остальных методиках [12–16] так же как и в [9] самые интенсивные волны давления наблюдаются при детонации, а при любом ином режиме энерговыделения волны давления получаются слабее.

Как отмечалось, документ [7] построен на основе научных работ д-ра физ.-мат. наук Б.Е. Гельфанда [1, 2]. Эти материалы и материалы [8, 9] использовались ФГБУ ВНИИПО МЧС России — разработчиком методики [7]. Например, в документе [10], подготовленном ФГБУ ВНИИПО МЧС России в 2006 г., математическая модель излагается абсолютно корректно и полностью совпадает с подходом, отраженным в настоящее время в [9], а вот уже в

«пожарном» ГОСТ Р 12.3.047—2012 [11] в описании модели взрыва облаков ТВС появляются те же проблемы, что и в [7].

Границы применимости существующих подходов

Приведенное выше замечание по документу [7] является не единственным. Так, в [7], равно как и в [8, 9], для аппроксимации давлений в ВУВ используется формула:

$$\ln(P_x) = -1,124 - 1,66\ln(R_x) + 0,26\ln(P_x)^2,$$

где P_x — безразмерное давление в ВУВ для режима детонации облака ТВС; R_x — безразмерное расстояние от центра взрыва.

Эта формула описывает кривую, изображенную на рис. 3 темно-синим цветом. Как видно из рис. 3, при расчетах по вышеприведенной формуле величина давления не является монотонно убывающей, а имеет минимум давления при безразмерном расстоянии, равном примерно 24 единицам, и последующий рост («загиб»), хотя общепринятой является ситуация, когда большим расстояниям соответствуют меньшие давления в волне давления. Такой «загиб» является нефизичным, и приведенная аппроксимация в этом диапазоне параметров использоваться не может. В [9] для этого имеется указание на ограничение диапазона применимости рассматриваемой формулы, а в [7] такое ограничение отсутствует. Соответственно, при расчетах по [7] может возникнуть ситуация, при которой становится возможным искаженный расчет размеров зон достижения заданного давления.

Отметим, что на рис. 3, наряду с аппроксимацией, используемой в [7] и [9], представлена более корректная монотонно убывающая аппроксимация для давления в ударной волне, возникающей при сферической детонации облака ТВС (кривая 1). Кривая 1 получена как результат высокоточного численного моделирования, она хорошо коррелируется с имеющимися экспериментальными данными, которые, однако, существуют только для области высоких (десятки кПа) избыточных давлений; тем не менее данная кривая справедлива и для областей более низких давлений (несколько кПа), поскольку принципы расчета и использованная модель являются универсальными для всего диапазона давлений.

Заключение

В настоящее время существует высокий уровень согласованности методологий оценки последствий взрывов облаков топливно-воздушных смесей в методических подходах МЧС России и Ростехнадзора. В обоих ведомствах используются физически обоснованные модели для оценки параметров ударных волн и волн сжатия, образующихся как при детонации, так и при дефлаграционном горении с различной скоростью. В то же время имеются некоторые

различия в этих методиках. Они касаются главным образом ограничений, которые накладываются на используемые математические модели. Во-первых, в методике МЧС России [7] отсутствует ограничение по уровню достигаемых давлений в ударных волнах и волнах сжатия. Во-вторых, для области низких давлений (несколько кПа) в методике [7] не установлено ограничение на область использования соответствующих зависимостей давления в волне от расстояния.

Эти различия определенным образом влияют как на расчетные размеры зон поражения, так и на показатели риска. Учитывая, что методика [7] определена единственным документом, на основе которого рассчитываются показатели пожарного риска, которые в свою очередь являются одним из основных критериев для принятия управленческих решений при проектировании и строительстве производственных и социальных объектов, рассмотренные особенности численной модели взрыва облака топливно-воздушных смесей приводят к не всегда оправданному увеличению консерватизма получаемых результатов, что определяет необходимость корректировки рассматриваемой методики [7] для гармонизации подходов различных ведомств к решению важных научно-практических задач.

Работа поддержана Программой повышения конкурентоспособности НИЯУ МИФИ.

Список литературы

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Баротермическое действие взрыва. — СПб: Астерион, 2006. — 657 с.
2. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. Газовые взрывы. — СПб: Астерион, 2007. — 238 с.
3. Шелкин К.И. Влияние шероховатости трубы на возникновение и распространение детонации в газах// Журнал экспериментальной и теоретической физики. — 1940. — Т. 10. — С. 823–832.
4. Бартльме Ф. Газодинамика горения. — М.: Энергоиздат, 1981. — 280 с.
5. Адушкин В.В., Гостинцев Ю.А., Фортвов В.Е. Энергетические характеристики взрыва и параметры ударных волн в воздухе при детонации водородосодержащих облаков в свободной атмосфере (препринт). — Черноголовка, 1995. — 85 с.
6. Гостинцев Ю.А., Губин С.А., Шаргатов В.А. Численное моделирование процессов при горении открытых объемов перемешанных газовых смесей (препринт). — Черноголовка, 1986. — 33 с.
7. Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах// Декларирование пожарной безопасности и оценка пожарного риска: сб. В 4 ч. Ч. 4. Нормативные правовые документы по оценке пожарного риска, методики и примеры. — Сер. 19. — Вып. 2. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. — 192 с.
8. РД 03-409—01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей (с изменениями и дополнениями)// Методики оценки последствий аварий на

опасных производственных объектах: сб. док. — Сер. 27. — Вып. 2. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2015. — 210 с.

9. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей: рук. по безопасности. — Сер. 27. — Вып. 15. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. — 44 с.

10. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий. URL: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo_po_otsenke_pozharnogo_riska_dlya_promyshlennykh_predpriyatii.pdf (дата обращения: 10.01.2020).

11. ГОСТ Р 12.3.047—2012. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (дата обращения: 10.01.2020).

12. Van Den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P. Methods for Calculation of physical effects — due to releases of hazardous materials (liquids and gases) — «Yellow Book». URL: <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffen.nl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (дата обращения: 10.01.2020).

13. Tang M.J., Baker Q.A. A new set of blast curves from vapor cloud explosion// Process Safety Progress. — 1999. — Vol. 18. — № 3. — P. 235–240.

14. Взрывные явления. Оценка и последствия. В 2 кн. Кн. 1/ У. Бейкер, П. Кокс, П.М. Уэстайн и др. — М.: Мир, 1986. — 319 с.

15. Review of Methods for Estimating the Overpressure and Impulse Resulting from a Hydrogen Explosion in a Confined-Obstructed Volume/ L Melani, I. Sochet, X. Rocourt, S. Jallais. URL: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2009/images/stories/papers/254.pdf> (дата обращения: 10.01.2020).

16. РБ Г-05-039—96. Руководство по анализу опасности аварийных взрывов и определению параметров их механического действия. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200061429> (дата обращения: 10.01.2020).

inform@safety.ru

Материал поступил в редакцию

14 января 2020 г.

Доработанная версия — 2 марта 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 36–42.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-36-42

On Some Differences in the Methodological Approaches when Modeling the Parameters of Pressure Waves from Combustion and Detonation of Fuel-Air Mixtures Clouds

A.A. Agapov, Cand. Sci. (Eng.), Director of the Computational Analysis Center, inform@safety.ru

STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

V.S. Safonov, Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate

Gazprom VNIIGAZ, Moscow, Russia

S.I. Sumskoy, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher

NRNU MEPhI, Moscow, Russia

A.A. Shvyryaev, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

Abstract

The main regularities of the formation of shock air waves and air compression waves during combustion or detonation of fuel-air clouds are briefly considered in the article. Specific features are discussed related to the mathematical model of fuel-air mixture explosion, which is used in the Methodology for determining the calculated values of fire risk at the production facilities. The considered Methodology uses the same mathematical model as the corresponding Safety Guide on the assessment of the emergency explosion consequences approved by Rostekhnadzor with some differences that are discussed in the article.

The approach of the Methodology is based on the consideration of one-dimensional pressure waves that are formed in the atmosphere during detonation or turbulent combustion of spherical uniformly mixed clouds. For such processes the approximate dependences of pressure on the distance are built. The validity, accuracy, as well as the field of application of such dependencies are considered in the work.

The conclusion is made about sufficient accuracy of the used dependencies and their good compliance to the current analogues and experiments, the provisions establishing the field of application of the extrapolation formulas for deflagration combustion are missing in the Methodology text. Due to this reason when calculating the situations are possible that at the same distance from the place of explosion of the clouds of fuel-air mixtures the pressure on the front of the detonation wave is significantly less (up to 7 times) than at the front of the deflagration waves. For deflagration combustion rates considered in the Methodology (up to 500 m/s), this result is incorrect.

The reasons for this discrepancy are shown in the article.

In Russia the Methodology is approved as the only document on which basis the fire risk indices are calculated, which in turn are one of the main criteria for making managerial decisions in the design and construction of industrial and social objects. It is shown that considered in the article specific features of the numerical explosion models of fuel - air mixtures cloud lead not always to the justified increase of the conservatism of the obtained results. It is noted that the indicated conservatism can be deleted by introducing appropriate limitations on the field of application of the corresponding approximations.

Key words: cloud explosion, fuel-air mixture, fire risk, emergency risk, deflagration, detonation, Methods.

References

1. Gelfand B.E., Silnikov M.V. Barothermic effect of the explosion. Saint-Petersburg: Asterion, 2006. 657 p. (In Russ.).
2. Gelfand B.E., Silnikov M.V. Gas explosions. Saint-Petersburg: Asterion, 2007. 238 p. (In Russ.).
3. Shchelkin K.I. The effect of pipe roughness on the occurrence and propagation of detonation in gases. *Zhurnal eksperimental'noy i teoreticheskoy fiziki = Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1940. Vol. 10. pp. 823–832. (In Russ.).
4. Bartlme F. Gas dynamics of combustion. Moscow: Energoizdat, 1981. 280 p. (In Russ.).
5. Adushkin V.V., Gostintsev Yu.A., Fortov V.E. Energy characteristics of the explosion and the parameters of the shock waves

in the air during detonation of hydrogen-containing clouds in the free atmosphere (preprint). Chernogolovka, 1995. 85 p. (In Russ.).

6. Gostintsev Yu.A., Gubin S.A., Shargatov V.A. Numerical modeling of processes during burning of open volumes of the mixed gas mixtures (preprint). Chernogolovka, 1986. 33 p. (In Russ.).

7. Methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities. *Deklarirovanie pozharnoy bezopasnosti i otsenka pozharnogo riska: sb. V 4 ch. Ch. 4. Normativnyye pravovyye dokumenty po otsenke pozharnogo riska, metodiki i primery* (Declaration of fire safety and fire risk assessment: Digest in 4 parts. Part 4. Regulatory legal documents for fire risk assessment, methods and examples). Ser. 19. Iss. 2. Moscow: ZAO NTTs PB, 2019. 192 p. (In Russ.).

8. RD 03-409—01. Methodology for assessing the consequences of emergency explosions of fuel-air mixtures (with amendments and additions). *Metodiki otsenki posledstviy avariyy na opasnykh proizvodstvennykh obektakh: sb. dok.* (Methods for assessing the consequences of accidents at hazardous production facilities: book of reports). Ser. 27. Iss. 2. Moscow: ZAO NTTs PB, 2015. 210 p. (In Russ.).

9. Methodology for assessing the consequences of emergency explosions of fuel-air mixtures: Safety Guide. Ser. 27. Iss. 15. Moscow: ZAO NTTs PB, 2019. 44 p. (In Russ.).

10. Fire risk assessment guide for industrial enterprises. Available at: http://www.complexdoc.ru/ntdpdf/541573/rukovodstvo_po_otsenke_pozharnogo_riska_dlya_promyshlennykh_predpriyatii.pdf (accessed: January 10, 2020). (In Russ.).

11. GOST R 12.3.047—2012. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200103505> (accessed: January 10, 2020). (In Russ.).

12. Van Den Bosch C.J.H., Weterings R.A.P. Methods for Calculation of physical effects — due to releases of hazardous materials (liquids and gases) — «Yellow Book». Available at: <http://content.publicatiereeksgevaarlijkstoffennl/documents/PGS2/PGS2-1997-v0.1-physical-effects.pdf> (accessed: January 10, 2020).

13. Tang M.J., Baker Q.A. A new set of blast curves from vapor cloud explosion. *Process Safety Progress*. 1999. Vol. 18. № 3. pp. 235–240.

14. Beyker U., Koks P., Uestayn P., Kulesh Dz., Strehlou R. Explosive phenomena. Assessment and consequences. In 2 books. Book 1. Moscow: Mir, 1986. 319 p. (In Russ.).

15. Melani L., Sochet I., Rocourt X., Jallais S. Review of Methods for Estimating the Overpressure and Impulse Resulting from a Hydrogen Explosion in a Confined-Obstructed Volume. Available at: <http://conference.ing.unipi.it/ichs2009/images/stories/papers/254.pdf> (accessed: January 10, 2020).

16. RB G-05-039—96. Guidance on hazard analysis of emergency explosions and determination of the parameters of their mechanical action. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200061429> (accessed: January 10, 2020). (In Russ.).

Received January 14, 2020
In final form — March 2, 2020

О проблеме учета несчастных случаев и о снижении травмоопасности в строительстве



В.М. Минько,
д-р техн. наук, проф.,
зав. кафедрой

ФГБОУ ВО «Калининградский государственный технический университет», Калининград, Россия



А. Басараб,
специалист по охране труда,
abakaryagina@bk.ru

Калининградский филиал ПАО «Ростелеком», Калининград, Россия

Рассмотрены вопросы, связанные с расследованием и учетом несчастных случаев в строительной отрасли России. По данным ряда стран, отсутствие учета легких случаев, непроведение по ним предупредительной работы являются причинами роста частоты несчастных случаев со смертельным исходом. Указаны основные направления снижения травмоопасности, необходимость повышения роли саморегулируемых организаций в оказании помощи малым строительным предприятиям по вопросам обеспечения охраны труда и промышленной безопасности.

Ключевые слова: строительство, несчастные случаи, учет, расследование, саморегулируемые организации.
Для цитирования: Минько В.М., Басараб А. О проблеме учета несчастных случаев и о снижении травмоопасности в строительстве// Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 43–47. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-43-47

Введение

По данным Международной организации труда, при полном учете несчастных случаев на производстве соотношение между числом несчастных случаев со смертельным исходом и всеми происшедшими случаями должно быть близко к 1:750. Это означает, что доля несчастных случаев со смертельным исходом должна составлять не более 0,13 %. В некоторых странах этот показатель не превышает 0,1 %, т.е. из тысячи расследованных случаев только один — со смертельным исходом. В России же этот показатель составляет, по данным Фонда социального страхования, 4,6 %, а в строительном производстве — 9,3 % [1–4]. Недостатки в области учета несчастных случаев — одна из причин высоких значений коэффициента частоты несчастных случаев со смертельным исходом.

Основные направления снижения травмоопасности

Исследование проблемы, связанной с учетом несчастных случаев на производстве в России, требует ответа на вопросы: является ли эта проблема региональной или же это проблема общероссийская? Соответственно, она должна рассматриваться для нахождения нужных управленческих решений. С этой целью рассмотрим показатели за 2009–2017 гг. по производственному травматизму в строительстве в целом по России и Калининградской обл.

Таблица 1

Годы	Показатели производственного травматизма в строительной отрасли							
	в России				в Калининградской обл.			
	$K_{ч_i}$	$K_{см_i}$	$q_{рФ_i}$	$(q_{рФ_i} - \bar{q}_{рФ})^2$	$K_{ч_i}$	$K_{см_i}$	$q_{рег_i}$	$(q_{рег_i} - \bar{q}_{рег})^2$
2009	3,1	0,28	9	0,09	1,70	0,24	14	24,01
2010	3,0	0,23	8	1,69	1,35	0,05	4	26,01
2011	2,7	0,24	9	0,09	1,36	0,05	4	26,01
2012	2,5	0,23	9	0,09	1,59	0,26	16	47,61
2013	2,2	0,21	10	0,49	1,82	0,25	14	24,01
2014	1,9	0,19	10	0,49	1,02	0,09	9	0,01
2015	1,8	0,19	11	2,89	1,02	0,05	5	16,81
2016	1,8	0,17	9	0,09	0,44	0,05	11	3,61
2017	1,8	0,17	9	0,09	0,90	0,05	5	16,81

(табл. 1, здесь $K_{ч}$ — коэффициент частоты несчастных случаев (общее число несчастных случаев за год, приходящееся на 1 тыс. работников); $K_{см}$ — коэффициент частоты несчастных случаев со смертельным исходом на 1 тыс. работников за год; q — доля несчастных случаев со смертельным исходом в общем травматизме, которая определяется как $q = (K_{см}/K_{ч}) \cdot 100$ %).

Требуется определить: значимо или незначимо различаются средние многолетние значения \bar{q} в целом по России и по одному из регионов России — Калининградской обл. Будем считать, что среднее значение $\bar{q}_{рФ}$ в целом по России соответствует гипотетической генеральной средней нормальной совокупности, поскольку она получена по данным всех регионов страны, а данные по конкретному

региону — это выборка из генеральной совокупности, по которой может быть получена выборочная средняя $\bar{q}_{\text{пер}}$.

Для проверки значимости различий между $\bar{q}_{\text{рф}} = 9,3$ и $\bar{q}_{\text{пер}} = 9,1$ (согласно расчетным данным табл. 1) воспользуемся аппаратом статистической проверки гипотез [5]. Так как выборочная средняя является несмещенной оценкой генеральной средней (доказательства приводятся в математической литературе) [5, 6], то нулевую гипотезу можно записать в виде $H_0: \bar{q}_{\text{рф}} = \bar{q}_{\text{пер}}$, конкурирующую — $H_1: \bar{q}_{\text{рф}} \neq \bar{q}_{\text{пер}}$. Для проверки нулевой гипотезы используем специальный критерий, записываемый в виде:

$$U = \frac{(\bar{q}_{\text{рф}} - \bar{q}_{\text{пер}}) \sqrt{n}}{\sigma}, \quad (1)$$

где n — объем выборки, в данном рассмотрении $n = 9$; σ — среднее квадратическое отклонение генеральной совокупности, определяемое по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (q_{\text{рф}_i} - \bar{q}_{\text{рф}})^2}. \quad (2)$$

Исходя из данных, представленных в табл. 1, $\sum_{i=1}^n (q_{\text{рф}_i} - \bar{q}_{\text{рф}})^2 = 6,1$. Поэтому получаем $\sigma = \sqrt{\frac{1}{9-1} \cdot 6,1} = 0,87$.

Наблюдаемое значение $U_{\text{набл}}$ критерия U находится по формуле (1) после подстановки в нее всех числовых значений.

Поскольку конкурирующая гипотеза имеет вид $H_1: \bar{q}_{\text{рф}} \neq \bar{q}_{\text{пер}}$, то критическая область двусторонняя. Критическая точка для критерия U в этом случае находится по таблице функции Лапласа исходя из равенства:

$$F(U_{\text{кр}}) = (1 - \alpha)/2, \quad (3)$$

где α — уровень значимости, который обычно принимается равным 0,05.

Изложенная выше методика относится к случаю нормального распределения случайной величины. Такое распределение может считаться нормальным при соблюдении правила трех сигм [6]. Это правило состоит в том, что если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратического отклонения. В данном рассмотрении $\sigma = 0,87$, соответственно, $3\sigma = 3 \cdot 0,87 = 2,61$. Согласно табл. 1 отклонение значений $q_{\text{рф}_i}$ от среднего значения 9,3 не превышает 2,61.

Исходя из данных табл. 1 и значения $\sigma = 0,87$ по формуле (1), получаем:

$$U_{\text{набл}} = \frac{(9,3 - 9,1) \sqrt{9}}{0,87} = 0,69.$$

Найденное значение критерия $U_{\text{набл}}$ сравнивается с критической точкой двусторонней критической области, которая определяется по таблице функции Лапласа (см. формулу (3)). Поскольку $(1 - \alpha)/2 = (1 - 0,05)/2 = 0,475$, то по указанной таблице находим $U_{\text{кр}} = 1,96$. Так как $U_{\text{набл}} < U_{\text{кр}}$, то нет оснований отвергнуть нулевую гипотезу. Таким образом, и в рассмотренном конкретном регионе проявляются недостатки, связанные с расследованием и учетом несчастных случаев в строительном производстве, характерные для всей России: примерно каждый 11-й несчастный случай — со смертельным исходом. Это возможно только при массовом сокрытии легких случаев. Ясно, что необходимые организационно-управленческие мероприятия по улучшению учета несчастных случаев должны быть приняты на уровне страны.

Важно отметить, что управление охраной труда и промышленной безопасностью, разработка предупредительно-профилактических мероприятий по снижению травмоопасности могут быть эффективными при условии обеспечения объективного расследования всех несчастных случаев на производстве, включая легкие. Это следует из того, что по материалам экспертных исследований [7] несчастные случаи различных категорий тяжести (легкие, тяжелые, со смертельным исходом) происходят по одним и тем же причинам, которые определяются конкретными условиями организации и выполнения работ, сопутствовавших происшествию. Поэтому, не расследуя легкие несчастные случаи, а они наиболее многочисленные, предприятия не могут выявлять все реальные причины несчастных случаев и формировать соответствующую предупредительно-профилактическую политику.

Следует иметь в виду, что для некоторых регионов значение U , определяемое по формуле (1), может оказаться больше $F(U_{\text{кр}})$. В этом случае нулевая гипотеза о равенстве средних значений должна быть отвергнута, а в качестве конкурирующей могут быть рассмотрены $H_1: \bar{q}_{\text{рф}} > \bar{q}_{\text{пер}}$ или $H_1: \bar{q}_{\text{рф}} < \bar{q}_{\text{пер}}$.

К сожалению, некоторые решения, принятые в области страхования от несчастных случаев, порядка их расследования, способствуют сокрытию случаев травмирования работников. Если, например, общий коэффициент частоты несчастных случаев на предприятии выше среднеотраслевого, то это ведет к повышению страхового тарифа [8]. Более обоснованным было бы применение этого увеличения только при наличии тяжелых несчастных случаев и несчастных случаев со смертельным исходом.

Методика расследования несчастных случаев, включая легкие, представляется слишком усложненной [9]. А для получения страховых выплат по несчастным случаям в региональные отделения фондов социального страхования нужно предоставлять целый ряд разных документов. Все это также способствует сокрытию несчастных случаев.

Наказательные меры за сокрытие несчастных случаев незначительны. Согласно ст. 15.34 Кодекса об административных правонарушениях Российской Федерации размер административного штрафа на должностных лиц за сокрытие — от 500 до 1 тыс. руб., на юридических лиц — от 5 тыс. до 10 тыс. руб. [10].

Новые закономерности в области учета несчастных случаев

Уже отмечалось, что сокрытие легких несчастных случаев, отсутствие по ним какой-либо предупредительной работы ведут к увеличению частоты несчастных случаев со смертельным исходом. Из статистики по строительным организациям России следует, что при очень низком общем коэффициенте частоты несчастных случаев страна имеет очень высокие показатели частоты несчастных случаев со смертельным исходом (табл. 2). По данным табл. 2 построен график, представленный на рисунке. Видно, что между коэффициентом частоты несчастных случаев со смертельным исходом $K_{см}$ и общим коэффициентом частоты несчастных случаев $K_ч$ в строительной отрасли указанных в таблице стран прослеживается гиперболическая зависимость, описываемая эмпирической формулой $K_{см} = 0,034 + 0,46/K_ч$. По мере увеличения $K_ч$, т.е. обеспечения расследования всех несчастных случаев, включая и легкие, принятия по ним предупредительных мер, наиболее важный показатель $K_{см}$ снижается.

Таблица 2

Страна	Показатели травматизма	
	$K_ч$	$K_{см}$
Россия	2,5	0,23
Германия	48,0	0,03
Италия	24,4	0,07
Польша	7,3	0,09
Литва	3,7	0,14
Евросоюз (в целом по всем входящим странам)	28,3	0,06

Зависимость $K_{см}$ от $K_ч$ имеет нелинейный характер. Поэтому для установления степени взаимной связи между указанными величинами определялось корреляционное отношение $K_{см}$ к $K_ч$. Значение корреляционного отношения $r_{K_{см}K_ч}$ может быть выявлено по формуле, приведенной в [2]:

$$r_{K_{см}K_ч} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (K_{см_i} - \bar{K}_{см})^2 - \sum_{i=1}^n (K_{см_i} - \bar{K}'_{см})^2}{\sum_{i=1}^n (K_{см_i} - \bar{K}_{см})^2}}, \quad (4)$$

где $\bar{K}'_{см}$ — среднее значение $K_{см}$ в группе, на которую разбивается весь ряд наблюдений. Группировка проводилась по значениям $K_ч$, располагаемым в порядке возрастания (Россия, Литва, Польша, Италия, Евросоюз, Германия), согласно рисунку.



▲ Зависимость $K_{см}$ от $K_ч$ в строительной отрасли России и стран Евросоюза за 2008–2016 гг.

▲ Dependence of $K_{см}$ on $K_ч$ in the construction industry of Russia and the countries of the European Economic Community for 2008–2016

В табл. 3 исходные данные разделены на две группы. В первой группе оказались три пары наблюдений (Россия, Литва, Польша), во второй — также три (Италия, Евросоюз, Германия). Для первой группы, согласно вычислениям, $\bar{K}'_{см} = 0,153$, для второй — $\bar{K}'_{см} = 0,053$.

Таблица 3

Группа	$K_ч$	$K_{см}$	$\bar{K}'_{см}$	$(K_{см_i} - \bar{K}'_{см})^2$	$(K_{см_i} - \bar{K}_{см})^2$
Первая	2,5	0,23	0,153	0,005900	0,01610
	3,7	0,14	0,153	0,000170	0,00137
	7,3	0,09	0,153	0,004000	0,00017
Вторая	24,4	0,07	0,053	0,000290	0,00109
	28,3	0,06	0,053	0,000049	0,00185
	48,0	0,03	0,053	0,000530	0,00533

Используя представленные в табл. 3 данные, по формуле (4) имеем:

$$r_{K_{см}K_ч} = \sqrt{\frac{0,0259 - 0,0109}{0,0259}} = 0,76.$$

Ошибка полученного корреляционного отношения составляет:

$$m_r = \frac{\pm(1 - r_{K_{см}K_ч}^2)}{\sqrt{n}} = \frac{\pm(1 - 0,76^2)}{\sqrt{6}} = \pm 0,17.$$

Так как $r_{K_{см}K_ч} > 3m_r$, т.е. $0,76 > 3 \cdot 0,17 = 0,51$, то найденное значение корреляционного отношения вполне надежно. Следовательно, корреляция между значениями $K_{см}$ и $K_ч$ достаточно высока. И если ставить задачи снижения смертности среди строителей, то необходимо принимать во внимание все несчастные случаи, устанавливать их причины и вести по ним предупредительную работу. Она должна заключаться в постоянном контроле непосредственно на строительных площадках за соблюдением требований безопасности в ходе работ [11], выявлении и

анализе причин несчастных случаев и подготовке соответствующих программ снижения травмоопасности, учитывающих значимость причин травмирования и эффективность включаемых в программу предупредительно-профилактических мероприятий.

Заключение

В строительной отрасли России заняты многочисленные малые предприятия, не имеющие служб охраны труда. Поэтому необходимо усиливать роль саморегулируемых организаций, которые должны оказывать помощь своим членам в решении вопросов охраны труда и промышленной безопасности.

Список литературы

1. Макаrchук М.В. Об учете несчастных случаев на производстве// Охрана труда и социальное страхование. — 2017. — № 9. — С. 58–65.
2. Сугак Е.Б. Природа производственного травматизма в аспекте управления профессиональными рисками// Безопасность жизнедеятельности. — 2015. — № 7 (175). — С. 3–6.
3. Абязов Н.Р. Динамика уровня травматизма и проблемы охраны труда на строительных предприятиях// Безопасность жизнедеятельности. — 2018. — № 11. — С. 6–10.
4. Минько В.М. Новый подход к учету несчастных случаев// Охрана труда. Практикум. — 2016. — № 12. — С. 39–46.
5. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике. — М.: Высшая школа, 2004. — 404 с.
6. Павлов С.В. Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие. — М.: РИОР: ИНФРА-М, 2010. — 186 с.
7. Минько В.М. Об авариях и других причинах несчастных случаев по данным современных экспертных исследований// Безопасность жизнедеятельности. — 2016. — № 2 (182). — С. 3–9.
8. Методика расчета скидок и надбавок к страховым тарифам на обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний: приказ Минтруда России от 1 авг. 2012 г. № 39 н (ред. от 7 февр. 2017 г.). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_134786/bb306aea5ddc7ee00781f69fe6c6c02751601a55/ (дата обращения: 18.01.2020).
9. Положение об особенностях расследования несчастных случаев на производстве в отдельных отраслях и организациях: постановление Минтруда России от 24 окт. 2002 г. № 73 (ред. от 14 нояб. 2016 г.). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_39925/6a82bfcfcb90a82f3584eff2ac20656977a3635/ (дата обращения: 18.01.2020).
10. Кодекс Российской Федерации об административных правонарушениях. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/a964ea800eaa74c96cf8a9c7731a071da06f4a8a (дата обращения: 18.01.2020).
11. Басараб А. О системном контроле состояния охраны труда и промышленной безопасности в строительных организациях// Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 11. — С. 58–64. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-11-58-64

abakaryagina@bk.ru

Материал поступил в редакцию 28 января 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 43–47.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-43-47

On the Problem of Work Injuries Record and on Reduction of Injury Hazard Risk in Construction

V.M. Minko, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department
Kaliningrad State Technical University, Kaliningrad, Russia
A. Basarab, Occupational Safety Specialist,
abakaryagina@bk.ru
Kaliningrad office Public Auction Company (PAC) «Rostelecom», Kaliningrad, Russia

Abstract

Issues related to the investigation and record of the work injuries in the construction industry of Russia are considered. Data on the work injuries in the construction industry in Russia and the Kaliningrad region for a number of years is presented. To process this data, the modern mathematical and statistical methods are used. It is proved that the problem of work injuries record is not regional, but all-Russian, requiring the adoption of preventive-prophylactic actions at the country level.

Based on data of the number of countries (Russia, Lithuania, Poland, Italy, Germany, the European Union) the hyperbolic dependence between the coefficient of the frequency of fatal incidents and the general coefficient of the frequency of incidents is revealed. Since the dependence of mortality on the frequency of general injury rate is of great practical importance, the correlation ratio of mortality to the total frequency of injuries was determined in the article, and the error of the correlation ratio was calculated. It was found that the correlation between the values of the considered indicators is quite high. Thus, the lack of record of the mild cases, non-conducting the preventive work on them are the reasons for the increase in the frequency of fatal incidents. The main areas of reducing risk of injury hazard, need to increase the role of self-regulatory organizations in rendering aid to the small construction enterprises on the issues of ensuring occupational and industrial safety are specified in the article.

Key words: construction, work injuries, record, investigation, self-regulatory organizations.

References

1. Makarchuk M.V. About the record of the work injuries. *Okhrana truda i sotsialnoe strakhovanie = Occupational safety and social insurance*. 2017. № 9. pp. 58–65. (In Russ.).
2. Sugak E.B. Nature of the work injuries in terms of occupational risk management. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti = Life Safety*. 2015. № 7 (175). pp. 3–6. (In Russ.).
3. Abyazov N.R. Dynamics of the level of work injuries and the problems of occupational safety at the construction enterprises. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti = Life Safety*. 2018. № 11. pp. 6–10. (In Russ.).
4. Minko V.M. The new approach to work injuries record. *Okhrana truda. Praktikum = Occupational safety. Practical manual on occupational safety*. 2016. № 12. pp. 39–46. (In Russ.).

5. Gmurman V.E. Guide to solving problems in probability theory and mathematical statistics. Moscow: Vysshaya shkola, 2004. 404 p. (In Russ.).

6. Pavlov S.V. Probability theory and mathematical statistics: Textbook. Moscow: RIOR: INFRA-M, 2010. 186 p. (In Russ.).

7. Minko V.M. On accidents and other causes of injuries according to the modern expert studies. *Bezopasnost zhiznedeyatelnosti = Life Safety*. 2016. № 2 (182). pp. 3–9. (In Russ.).

8. Methods for calculating discounts and allowances to insurance tariffs for compulsory social insurance against work injuries and occupational diseases: Order of Mintrud of Russia dated August 1, 2012 № 39 n (as amended on February 7, 2017). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_134786/bb306aea5ddc7ee00781f69fe6c6c02751601a55/ (accessed: January 18, 2020). (In Russ.).

9. Regulation on the specifics of the investigation of work injuries in the individual branches of industries and organizations: Resolution of Mintrud of Russia of October 24, 2002 № 73 (as amended on November 14, 2016). Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_39925/6a82bfcfcb90a82f3584ef-f2ac20656977a3635/ (accessed: January 18, 2020). (In Russ.).

10. Code of the Russian Federation on administrative infractions. Available at: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_34661/a964ea800eaa74c96cf8a9c7731a071da-06f4a8a (accessed: January 18, 2020). (In Russ.).

11. Basarab A. On the System Control of Labor Protection and Industrial Safety Condition in the Construction Organizations. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2017. № 11. pp. 58–64. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2017-11-58-64

Received January 28, 2020

К 75-летию Великой Победы

ПОЛЯНИНА Валентина Адамовна

Начальник отдела по надзору в нерудной и химической промышленности Управления Татарского округа Госгортехнадзора СССР в отставке.



Родилась В.А. Полянина 26 июня 1920 г. на станции Борзя Дальневосточного края. Отец и мать работали на железной дороге, отец — машинистом паровоза (умер в 1924 г.), мать — курьером, затем дежурной. В 1934 г. они переехали в Иркутск-II, где она поступила в Томский индустриальный техникум, который в 1940 г. окончила по специальности «горный техник — маркшейдер». «Как вспоминает Валентина Адамовна, в годы войны и до февраля 1948 г.» — вспоминает Валентина Адамовна, она трудилась на Урале на бокситовых рудниках в системе Минцветмета СССР. Участвовала в разработке Соколовского бокситового месторождения — его нужно было подготовить для скорейшего ввода в эксплуатацию, так как страна нуждалась в алюминии. Сначала открыли карьер, затем провели от него



железную дорогу к Уральскому алюминиевому заводу (г. Каменск-Уральский), который в годы войны был единственным предприятием страны, где производился алюминий. Занимала должности маркшейдера, коллектора, инженера технического отдела, сменного мастера шахты, заведующего отделом техники безопасности. Награждена медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».

В 1948 г. В.А. Полянина с семьей переехала в Казань, где некоторое время работала в Поволжском окружном управлении ГГТИ, а с декабря 1954 г. — в Управлении Татарского округа Госгортехнадзора СССР, где прошла путь от инженера-инспектора газового надзора до начальника отдела по надзору в нерудной и химической промышленности. С 1969 г. она — на заслуженном отдыхе.

Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода



А.В. Панфилов,
panfilov@ikcmysl.ru,
канд. техн. наук, доцент
(ДГТУ, Ростов-на-Дону,
Россия),
директор по сертифика-
ционной деятельности
(ООО ИКЦ «Мысль» НГТУ,
Новочеркасск, Россия)



В.В. Дерюшев,
д-р техн. наук,
проф.
ДГТУ, Ростов-на-
Дону, Россия



А.А. Короткий,
д-р техн. наук, проф.
ДГТУ, Ростов-на-
Дону, Россия

Статья посвящена вопросам создания рекомендательных систем безопасности для риск-ориентированного подхода при эксплуатации опасных объектов, применяющих дистанционный контроль (мониторинг) и цифровые информационно-технологические системы, функционирующие с использованием мобильных приложений.

Ключевые слова: рекомендательные системы безопасности, дистанционный контроль, риск-ориентированный подход, оценка риска, прогнозирование риска, цифровые информационно-технологические системы, мобильные приложения.

Для цитирования: Панфилов А.В., Дерюшев В.В., Короткий А.А. Рекомендательные системы безопасности для риск-ориентированного подхода // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 48–55. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-48-55

Введение

Тенденция развития современного законодательства в области промышленной безопасности с учетом цифровой экономики предполагает создание систем дистанционного контроля эксплуатации опасных объектов. В проекте Федерального закона «О промышленной безопасности» [1] предлагается внедрение государственного мониторинга в области промышленной безопасности, основанного на автоматизированном сборе, фиксации, обобщении, систематизации и оценке информации, обработанной системами дистанционного контроля опасных производственных объектов. Продолжается внедрение модели государственного регулирования в области промышленной безопасности на базе методов риск-ориентированного подхода [1–3]. Технический прогресс и современное законодательство предъявляют к системам безопасности объектов новые требования в части принятия решений при риск-ориентированном подходе. Несмотря на предпринимаемые беспрецедентные меры по надзору и контролю государства к эксплуатирующим организациям, аварийность остается на высоком уровне и связана на 90 % с человеческим фактором. Для устранения причин аварийности необходимо внедрение новых методов контроля за техническим состоянием и персоналом, основанных на современных цифровых информационных технологиях [4]. Объем информации по промышленной безопасности настолько обширен, что не позволяет нормальному человеку быстро и своевременно ее проанализировать в целях при-

нятия наиболее рационального или оптимального решения за ограниченный промежуток времени. В современных условиях цифровой экономики необходимо создавать рекомендательные системы безопасности, позволяющие в мобильных приложениях через индивидуальные средства связи предлагать быстро усваиваемые рекомендации лицам, принимающим решения, для предотвращения аварийных ситуаций на опасных производственных объектах.

Теория вопроса

Риск-ориентированный подход в контрольной и надзорной деятельности представляет собой методологию, обеспечивающую целевое воздействие надзорных функций на объекты контроля. Они основаны на анализе состояния технических устройств, риска их аварий и инцидентов в соответствии со значимостью последствий таких аварий и инцидентов для безопасности и здоровья населения. Одним из основных направлений риск-ориентированного подхода является внедрение рекомендательных систем, использующих информационные технологии. В этих целях создаются программные продукты, которые в режиме реального времени собирают функциональную и лингвистическую информацию о текущем состоянии опасных объектов, прогнозируют и оценивают риски развития аварийных ситуаций, обучаются на основе анализа случившихся неблагоприятных событий, прогнозируют риски наступления возможных аварий. Это дает возможность рекомендовать меры своевременного реагирования,

обеспечивающие безопасность эксплуатации объектов [5, 6].

Таким образом, сущность решаемой проблемы состоит в повышении безопасности эксплуатации опасных объектов при дистанционном контроле (мониторинге) на основе цифровых информационно-технологических систем, функционирующих с использованием мобильных приложений к персональным мобильным устройствам руководящего состава, инженерно-технических работников, обслуживающего персонала и инспекторов надзорного органа.

Создаваемый продукт предназначен для лиц, принимающих решения по оценке риска возможной аварийной ситуации на опасных объектах. В основе лежит алгоритм комбинаторного взаимодействия элементов рекомендательной системы и системы поддержки принятия решений с использованием лингвистических и функциональных критериев диагностики технического состояния объекта. При этом сам алгоритм и множество критериев, определяющих текущее состояние безопасности объекта, изменяются (адаптируются) в зависимости от выявленных объективных причин аварий и инцидентов на других опасных объектах и внешних условий. Это определяет необходимость использования аппарата искусственных нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения для построения интеллектуальной системы, позволяющей выполнить переход (свертку) из неструктурированного многомерного нечеткого пространства индикаторов (показателей), характеризующих текущее состояние безопасности объекта, к одному индикатору (интегральному показателю), характеризующему риск возникновения аварии.

Фиксирование индикатора риска само по себе не является доказательством соблюдения или нарушения предъявляемых к объекту требований безопасности, но свидетельствует о возможности такого нарушения и может являться основанием для проведения внеплановой проверки или иных форм контроля, вплоть до полного блокирования работы объекта.

Системы поддержки принятия решений актуальны для сложных многоуровневых систем, каковыми и являются опасные объекты. Информация по оценке состояний техники и оценке риска аварий в таких системах является мало структурированной или полностью неструктурированной. Это предполагает использование больших массивов входящих данных и многокритериальных схем их обработки, сложных многоуровневых деревьев и (или) нелинейных функций принятия решений, учитывающих как наличие данных с датчиков, так и экспертное мнение [7–9].

Технологическое предложение

Предлагаемая адаптивная система дистанционно-го мониторинга безопасности эксплуатации опасных объектов на основе IT-технологий и риск-ориенти-

рованного подхода может использоваться для мониторинга безопасности технических устройств, применяемых в промышленности и социальной сфере:

- в грузоподъемных кранах, лифтах, канатных дорогах, эскалаторах, подъемниках, газовом оборудовании;

- на транспорте — воздушном, автомобильном, речном, морском, железнодорожном;

- в различных промышленных установках и агрегатах, используемых в технологических процессах [10].

Система и реализующий ее программный продукт — актуальное инновационное решение, повышающее уровень промышленной безопасности от аварий на производстве и безопасности жизнедеятельности населения в целом. Новизна предлагаемого решения заключается прежде всего в построении логико-лингвистической модели оценивания риска аварии, основанной на принципах, изложенных в работах [11–13].

Решение по оценке риска при эксплуатации опасных объектов принимается на основании уникального алгоритма комбинаторного преобразования лингвистических критериев диагностики технического состояния, реализуемых специалистами (физическими лицами), и функциональных индикаторных параметров локальной системы безопасности, получаемых от приборов, которыми оснащен объект. Оценки по шкалам лингвистических критериев являются нечеткими подмножествами некоторых базовых множеств. Лингвистические критерии могут быть с измеримой (числовые) и с неизмеримой (ординальные) базовой переменной. Вводимые в цифровую платформу лингвистические критерии и функциональные параметры в общем случае образуют неструктурированное или слабо структурированное нечеткое множество показателей — критериев оценки состояния объекта. При этом значения критериев на элементах некоторого конечного множества A опасных объектов образуют матрицу оценок:

$$X = \|x_{ij}\|_{nm},$$

где x_{ij} — оценка технического состояния объекта a_i по шкале k_j , $x_{ij} = k_j(a_i)$; n — число объектов в множестве $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$; m — число лингвистических и функциональных критериев (шкал оценок) в множестве $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$, образующем критериальное пространство \mathbf{Re}^m , объекты внутри которого отображаются в виде множества точек [11].

Для ординальных лингвистических критериев с неизмеримыми базовыми переменными физические шкалы могут вообще не существовать. В этом случае при формализации таких критериев используются некоторые базовые терм-множества $T = \{T_j\}$, состоящие из нескольких термов [12]. Примером ординального лингвистического критерия является,

например, критерий «Качество» с термами: «хорошее», «соответствует», «недостаточное», «плохое».

Если исходное критериальное пространство Re^m содержит лингвистические переменные (в том числе ординальные), то формируемый в результате преобразований интегральный показатель, характеризующий риск возникновения аварии, в общем случае также будет составной ординальной лингвистической переменной L . Иерархическая структура такой переменной может формироваться рекуррентно с «низших» уровней, на которых располагаются переменные, определяемые первоначальной лингвистической и функциональной информацией об объекте.

Для установления количественного соответствия между признаком объекта (ординальной лингвистической переменной L) и свойством S , степень наличия которого у объекта может быть размытой (неопределенной), необходимо уравнение назначения возможности [12]. Свойство S в данном случае представляет собой техническое состояние объекта, определяющее безопасность его эксплуатации. Неопределенность наличия данного свойства у объекта здесь носит по своей природе не вероятностный, а «возможностный» характер. Уравнения назначения возможности для лингвистических переменных строятся на основе следующего общего принципа.

Общее высказывание P , определяющее лингвистическую переменную L , записывается в виде: L есть G , где L — m -арная переменная в критериальном пространстве Re^m (m — число критериев, входящих в лингвистическую переменную L , соответствующую общему понятию риска возникновения аварии при эксплуатации объекта); G — нечеткое отношение в базовом пространстве $X = X_1, \dots, X_m$ между подмножествами S_i ($i = 1, \dots, m$), описывающими отдельные свойства, определяющие техническое состояние объекта. Тогда распределение возможностей, связанное с m -арной переменной L , будет определяться уравнением назначения возможностей:

$$P_L = G,$$

где P_L — распределение возможностей, связанное с лингвистической переменной L . Это уравнение представляет собой формализованное выражение сложного лингвистического понятия, каким является понятие риска возникновения аварии при эксплуатации объекта.

Основным методом решения уравнения назначения возможностей является проблема назначения числовых оценок субъективным свойствам. Основным методом решения этой проблемы является построение функций принадлежности объекта к нечеткому множеству [11]. При введении в модель оценивания риска функций принадлежности используем аксиоматическую структуру, предложенную в работе [12], для фундаментального измерения нечеткости. В соответствии с введенными определени-

ями и теоремами результирующие значения функции принадлежности ограничены снизу числом, приспанным объекту a_{\min} или классу эквивалентности этого объекта $[a_{\min}]$, и сверху значением, присвоенным объекту a_{\max} или его классу эквивалентности $[a_{\max}]$. Здесь a_{\max} — объект, функция принадлежности которого свидетельствует о том, что он определенно обладает свойством S ; a_{\min} — объект, который определенно не обладает свойством S .

Оцениваемое свойство S разбивает область A с физическим носителем $X(A)$ на три подобласти: I_0 , I_1 и F . Две «области безразличия» I_0 и I_1 образованы объектами в классах эквивалентности $[a_{\min}]$ и $[a_{\max}]$ соответственно. Функция принадлежности для «нечеткой области» F , как правило, строится путем формального задания с учетом свойств безопасности конкретных объектов.

Тогда в рассматриваемой системе предлагается использовать для ординальной лингвистической переменной «Риск аварии» три элементарных термина, соответствующих подобластям I_0 , I_1 и F , которые визуализируются в виде шкалы индикаторов цветовой панели (например, красный, желтый, зеленый). Сигнал опасности в цветовой гамме не требует расшифровки, интуитивно понятен руководителю, персоналу и доступен контролирующим органам. Принадлежность объекта к одному из трех введенных термов (нечетких множеств) определяется по значениям так называемых индикаторов риска.

В качестве индикаторов риска предлагается использовать значения универсальной переменной u , вводимой при задании элементарных термов в соответствии со следующими требованиями [11].

1. Каждый терм описывается нечетким подмножеством множества значений универсальной переменной u из интервала $[0, 1]$.

2. Объединение всех элементов терм-множества покрывает полностью множество значений базовой переменной $X(A)$ и соответствующего интервала $[0, 1]$ универсальной переменной u .

3. Функции принадлежности элементарных термов строятся в шкале интервалов с использованием L - R -аппроксимации или другими методами [8, 9].

С учетом этих требований функции принадлежности терм-множеств, описывающих свойство безопасности эксплуатации объектов, определим функцией следующего вида:

$$\mu_D = 1 - u^i.$$

Тогда, если индикатор риска u равен 0, то риск отсутствует и эксплуатация объекта абсолютно безопасна. Если индикатор риска u равен 1, то риск максимальный и эксплуатация объекта должна быть прекращена.

Показатель степени i определяет слабый порядок на интервале a_i в области A и устанавливает характер изменения функции принадлежности при возвра-

станции индикатора риска. Если $\gamma > 1$, то одинаковые по величине отклонения индикатора риска приводят к большему приросту функции принадлежности μ_D в области, близкой к нулю, чем в области, близкой к единице.

Таким образом, ключевыми моментами определения функции принадлежности являются преобразование базовых переменных $X(A)$ в универсальную переменную u , найденную на интервале $[0, 1]$, и определение значений индикаторов риска u_{\max} и u_{\min} , устанавливающих принадлежность объекта к одному из трех определенных в таблице термов.

Термы лингвистической переменной оценки риска аварии на объекте	Индикаторы риска
Уровень приемлемого риска — эксплуатация объекта разрешена в обычном режиме	$u \leq u_{\min}$; $a_i \geq s [a_{\max}]$; зеленый цвет
Повышенный уровень риска — эксплуатация объекта разрешена при усиленном контроле	$u_{\max} < u < u_{\min}$; $[a_{\max}] > s a_i > s [a_{\min}]$; желтый цвет
Высокий уровень риска — эксплуатация не рекомендуется (как исключение возможно выполнение единичных операций при строгом контроле)	$u > u_{\min}$; $a_i \leq s [a_{\min}]$; красный цвет

Заявленные функции логико-лингвистической модели оценивания риска аварии при эксплуатации опасных объектов предлагается реализовать с применением разработанных уникальных, не имеющих аналогов технологий на базе нейронных сетей.

Данные технологии с использованием элементов искусственного интеллекта позволяют проводить машинное обучение и корректировать алгоритм расчета риска аварии с учетом официальной информации об объективных причинах аварий на других опасных объектах. Адаптация заключается не только в уточнении значения индикаторов риска, но и изменении самого критериального пространства под сложные условия эксплуатации и новые средства обеспечения безопасности путем изменения множества критериев $K = \{k_1, k_2, \dots, k_m\}$ и соответствующих функций принадлежности. Сущность алгоритма машинного обучения заключается в определении областей I_1 , I_0 и F . Для этого необходимо указать объекты (или значения соответствующих признаков объектов), которые определенно обладают свойством S (область I_1 безопасной эксплуатации) и столь же определенно не обладают этим свойством (область I_0 аварийных объектов). Таким образом, могут быть сформированы нижняя x_0 и верхняя x_1 границы на непрерывном носителе $X(A)$, определяющие область F изменения функции принадлежности.

Процедура машинного обучения реализуется в два этапа. На первом с использованием технологии обработки больших данных (Big Data) проводится обучение искусственной нейронной сети на данных по функциональным индикаторным параметрам

локальной системы безопасности, получаемых от приборов, которыми оснащены объекты. На втором происходит семантическая обработка данных, поступающих от обслуживающего персонала и инженерно-технических работников на естественном языке, и формируются лингвистические критерии оценки состояния объекта с учетом принципа достаточности.

Первый этап обучения предполагает решение трех задач

Первая задача заключается в обучении нейронной сети на исторических данных с обязательным учетом функциональных индикаторных показателей локальной системы безопасности объекта, для которого проводится теоретический расчет. Для расчетов используются специфические для анализируемых опасных объектов показатели безопасности, например, нарушение координатной защиты, резкие динамические нагрузки при работе, превышение угла поворота, давления, температуры, числа оборотов и т.п. Схема процесса обучения нейронной сети на исторических данных показана на рис. 1.



▲ Рис. 1. Функциональная схема процесса обучения нейронной сети на исторических данных
▲ Fig. 1. Functional diagram of the neural network learning process based on the historical data

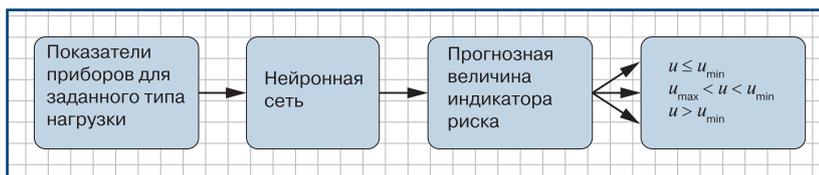
На вход нейронной сети подаются исторические данные, формирующие множество значений базовой переменной $X(A)$, накопленные до текущего момента, как правило, за прошедший год для выбранного множества A опасных объектов.

На выход нейронной сети подаются исторические данные с аварийных объектов из множества A аналогичных объектов. Таким образом, могут быть сформированы нижняя x_0 и верхняя x_1 границы на непрерывном носителе $X(A)$, определяющие область F изменения функции принадлежности.

Обучение нейронной сети основано на методе обратного распространения «ошибки» между историческими данными и данными с аварийных объектов. При этом в нейронной сети формируется многозначная структура принадлежности объекта к одному из трех нечетких множеств ($a_i \geq s [a_{\max}]$ для зеленой зоны, $[a_{\max}] > s a_i > s [a_{\min}]$ для желтой зоны и $a_i \leq s [a_{\min}]$ для красной зоны). Одновременно определяются значения индикаторов риска u_{\max} и u_{\min} .

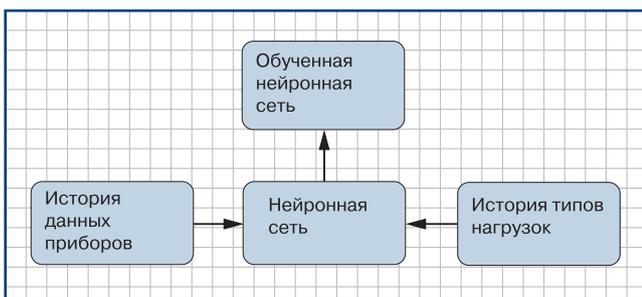
Вторая задача представляет собой проверку адекватности функционирования нейронной сети. На ее вход подаются данные плановых (оптимальных для попадания в зеленую зону) показателей приборов для заданного типа нагрузки, сформированные на исто-

рических данных. На выходе получаем прогнозную величину индикатора риска при заданных условиях эксплуатации оборудования, которая должна попадать в зеленую зону, т.е. $u \leq u_{\min}$. Функциональная схема процесса проверки нейронной сети показана на рис. 2. При отклонении (оптимальных) плановых показателей от «оптимальных» значений прогнозная величина индикатора риска должна попасть в желтую зону ($u_{\max} < u < u_{\min}$), а при приближении плановых показателей к аварийным значениям прогнозная величина индикатора риска будет в красной зоне ($u > u_{\min}$). Аналогично проводится проверка адекватности на реальных объектах, т.е. прогнозная величина индикатора риска для данного типа нагрузки должна соответствовать реальному состоянию безопасности эксплуатации объекта.



▲ Рис. 2. Функциональная схема процесса проверки нейронной сети
▲ Fig. 2. Functional diagram of the neural network verification process

Третья задача заключается в формировании в нейронной сети структуры ее адаптации к изменению условий эксплуатации и типов рабочих заданий, выполняемых объектами. Для этого используется уникальная технология распознавания производственных операций по графикам характеристик и показаний приборов путем постоянного обучения нейронной сети, которая выполняется с учетом динамики изменения получаемых данных при разных типах нагрузок и факта исполнения показаний приборов [14]. Схема процесса формирования адаптационной структуры показана на рис. 3.



▲ Рис. 3. Функциональная схема технологии распознавания условий эксплуатации и типов заданий, выполняемых объектами
▲ Fig. 3. Functional diagram of the technology for recognizing operating conditions and types of tasks performed by the facilities

На втором этапе обучения нейронной сети формируется множество лингвистических критериев диагностики технического состояния объекта путем семантической обработки данных, поступающих на

вход нейронной сети на естественном языке от обслуживающего персонала и инженерно-технических работников, эксплуатирующих объект.

Использование человеческого интеллекта (знаний, умений и навыков) при лингвистической диагностике технического состояния объекта в данной системе необходимо, так как охватить приборными методами контроля все диагностические параметры, характеризующие безопасность при эксплуатации опасных технических объектов, практически невозможно. Кроме того, это позволяет учитывать в режиме реального времени постоянно поступающую информацию о причинах аварий на аналогичных объектах и изменениях в нормативно-правовой документации.

При лингвистической диагностике технического состояния объекта в сочетании с приборной диагностикой возникает синергетический эффект, проявляющийся в существенном повышении точности диагностики состояния и оценки риска наступления аварийной ситуации на объекте за счет уменьшения степени неопределенности. Это обусловлено взаимным влиянием всех диагностических параметров друг на друга в процессе машинного обучения с использованием нейронных сетей.

На данной стадии машинного обучения специалист сам вносит корректировки в алгоритм оценки риска возможной аварии и соответствующие чек-листы, формируемые с учетом визуальных подсказок в мобильных приложениях. Это позволяет системе в дальнейшем научиться автоматически корректировать шаблоны чек-листов, вводя новые диагностические параметры. Блок формирования лингвистических критериев и соответствующих им чек-листов строится по технологиям рекомендательных систем.

Безусловно, структура сбора данных на естественном языке ограничена. Основное требование здесь — четкость ответов оператора на вопросы, предусмотренные чек-листами. В то же время предлагаемый подход позволяет давать количественную оценку типовым нечисловым ответам: «чуть-чуть», «немного», «недавно», «давно».

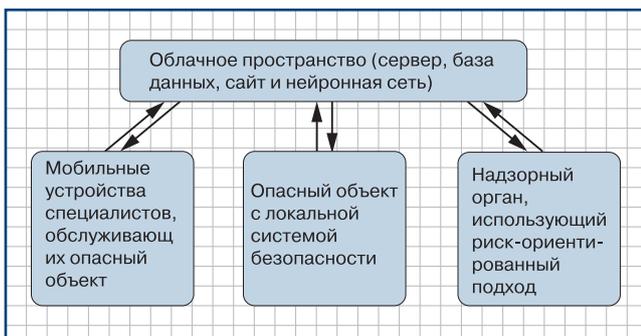
Перечень вопросов чек-листов, отражающих требования федеральных норм и правил эксплуатации оборудования, зависит от вида контролируемых объектов и конкретной производственной ситуации. К числу общих вопросов чек-листов, например, относятся: «Срок эксплуатации оборудования?», «Когда проводилась последняя экспертиза промышленной безопасности объекта?», «Наличие страховки?», «Сроки последнего ТО?», «Производитель работ?» и др. Специальные вопросы чек-листов для конкретного оборудования, например, имеют вид: «Оценка выработки поверхности реборды от первоначальной

толщины?», «Оценка выработки поверхности катания колеса?», «Присутствуют ли трещины любых размеров на барабанах?», «Какой износ ручья барабана по профилю?», «Имеются ли любые трещины в сварных швах и основном металле?» и др.

При обучении искусственной нейронной сети на данном этапе происходят распознавание ответов с использованием технологии NLP (англ. Natural Language Processing) и многокластерная категоризация их содержания. При этом формируется множество соответствующих лингвистических критериев в критериальном пространстве Re^m . В конечном итоге машинное обучение позволяет системе прогнозировать во времени наступление предельных значений существующих диагностических параметров по кривой аппроксимации, строящейся по специальному алгоритму, обучение которого корректируется при каждой последующей операции диагностирования.

Таким образом, программное обеспечение машинного обучения и адаптации системы мониторинга безопасности использует современные алгоритмы на базе нейронных сетей, позволяющие реализовать предлагаемый подход в сложных режимах эксплуатации, реальных погодных условиях и других нестандартных ситуациях.

На рис. 4 представлена функциональная схема взаимодействия программной и аппаратной частей предлагаемой рекомендательной системы безопасности для риск-ориентированного подхода при эксплуатации опасных объектов, применяющих дистанционный контроль (мониторинг) и цифровые информационно-технологические системы, функционирующие с использованием мобильных приложений.



▲ Рис. 4. Функциональная схема взаимодействия программной и аппаратной частей рекомендательной системы безопасности

▲ Fig. 4. Functional diagram of interaction between the software and hardware parts of the recommendation-based safety system

Заключение

Предлагаемое построение цифровой платформы рекомендательной системы безопасности обеспечивает поддержку принятия решения по защите опасных объектов от аварий при эксплуатации. Веб-приложение построено на основе оценки риска

методами искусственного интеллекта для риск-ориентированного подхода, учитывающего лингвистические критерии диагностики технического состояния и функциональные параметры его локальной системы безопасности, оснащенной электронным ключом блокировки [14].

Предлагаемая система является первым в полной степени комбинированным цифровым решением, построенным с использованием технологий рекомендательных систем (формирование лингвистических критериев безопасности) и систем поддержки принятия решений (оценка индикаторов риска эксплуатации опасных технических объектов).

Особенностями данной системы являются проводимая в режиме реального времени интеграция антропоморфных и машинных данных, учет всей доступной информации, оценка рисков и помощь оператору в принятии решений, состоящая в использовании на разных стадиях сбора и обработки данных нескольких алгоритмов на базе нейронных сетей, так называемых технологий искусственного интеллекта, включающих:

- анализ больших данных (Big Data);
- сбор и квалификацию данных на естественном языке (Natural Language Processing, NLP);
- семантическую интерпретацию данных;
- квалификацию данных в рамках нечетких критериальных множеств.

Основным результатом использования данной системы является снижение аварийности при эксплуатации опасного объекта, которое происходит благодаря увеличению достоверности дистанционного контроля при выработке рекомендаций по принятию решений предупредительного характера с уменьшением численности персонала и инспекторского состава, в том числе расходов на их содержание.

Рекомендательная система безопасности позволяет унифицировать и систематизировать требования надзорных органов к эксплуатации машин и выносить рекомендации на основе объективных данных, снятых на объекте, повышая качество и прозрачность работы государственных контролирующих служб.

Создание системы поддержки принятия решений по оценке риска аварий на опасных объектах автоматизирует процесс контроля, позволит использовать ее в удаленных регионах, в том числе и труднодоступных, повышая равенство предприятий и жителей регионов в доступе к новым технологиям.

Список литературы

1. Проект Федерального закона «О промышленной безопасности». URL: <https://regulation.gov.ru/projects#npa=92266> (дата обращения: 02.03.2020).
2. Риск-ориентированный подход к организации надзорной деятельности в области промышленной безопасности / А.А. Короткий, А.А. Кинжибалов, А.В. Панфилов, Д.А. Курилкин // Безопасность труда в промышленности. — 2016. — № 2. — С. 58–63.

3. *Совершенствование современных систем безопасности башенных кранов на основе цифровых технологий в условиях риск-ориентированного надзора/* А.А. Короткий, А.В. Панфилов, А.А. Кинжибалов, А.В. Кинжибалов// Наука и бизнес: пути развития. — 2018. — № 7 (85). — С. 46–54.

4. *The use of magnetic marks in steel wire ropes/* A.S. Khoroshev, A.V. Pavlenko, D.A. Tchoutchkin et al. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012072/pdf> (дата обращения: 02.03.2020).

5. *Ye L., Fei Z., Liang J. A method of online safety assessment for industrial process operations based on hopf bifurcation analysis//* Industrial and Engineering Chemistry Research. — 2011. — Vol. 50. — № 6. — P. 3403–3414. DOI: 10.1021/ie1018854

6. *Prospects of safety control in combination of mining and metallurgy industries/* A.E. Filin, O.M. Zinovieva, L.A. Kolesnikova, A.M. Merkulova// Eurasian Mining. — 2018. — № 1. — P. 31–34.

7. *Development of implementation chart for non-stationary risks minimization management technology based on information-management safety system/* N.Kh. Abdrakhmanov, K.N. Abdrakhmanova, V.V. Vorokhobko et al.// Journal of Engineering and Applied Sciences. — 2017. — Vol. 12. — № S6. — P. 7880–7888.

8. *The use of mathematical models in the assessment of the measurements uncertainty for the purpose of the industrial safety condition analysis of the dangerous production objects/* A.V. Fedosov, N.K. Abdrakhmanov, E.S. Gaysin et al.// International Journal of Pure and Applied Mathematics. — 2018. — Vol. 119. — № 10. — Spec. Iss. C. — P. 433–437.

9. *Pinch analysis-based approach to industrial safety risk and environmental management/* R.R. Tan, M.K.A. Aziz, D.K.S. Ng et al.// Clean Technologies and Environmental Policy. — 2016. — Vol. 18. — № 7. — P. 2107–2117.

10. *Improving efficiency in a manufacturing company using the inmotion process/* M. Bosák, L. Štofová, P. Szaryszová et al.// Quality — Access to Success. — 2019. — Vol. 20. — № 170. — P. 64–67.

11. *Дерюшев В.В., Сидельникова Е.Г. Обобщенный показатель достаточности для оценивания технического состояния строительной и подъемно-транспортной техники//* Научное обозрение. — 2013. — № 9. — С. 164–167.

12. *Дерюшев В.В., Сидельникова Е.Г. Структура и модель построения интегрального показателя для оценивания качества строительной и подъемно-транспортной техники//* Научное обозрение. — 2013. — № 9. — С. 311–313.

13. *Дерюшев В.В., Сидельникова Е.Г. Выбор альтернативных решений при наличии риска с учетом факторов неопределенности//* Научное обозрение. — 2013. — № 9. — С. 325–328.

14. *Пат. 2682020* Рос. Федерация. Способ дистанционного контроля безопасности при эксплуатации объекта на базе цифровых информационно-технологических систем/ А.В. Лагереv, И.А. Лагереv, П.С. Каныгин и др.; заявл. 22.02.2018; опубл. 14.03.2019, Бюл. № 8.

panfilov@ikcmysl.ru

Материал поступил в редакцию 23 марта 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 48–55.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-48-55

Recommended Safety Systems for Risk-Oriented Approach

A.V. Panfilov, panfilov@ikcmysl.ru, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Director on Certification Activities

OOO Engineering and Consulting Center «Mysl», Novo-cherkassy State Technical University, Novocherkassk, Russia

V.V. Deryushev, Dr. Sci. (Eng.), Prof.

A.A. Korotkiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof.

Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Abstract

The article is devoted to the creation of recommendation-based safety systems for a risk-oriented approach when operating hazardous facilities that are using remote control (monitoring) and digital information technology systems which are functioning using mobile applications.

The proposed construction of the digital platform for the recommendation-based safety system ensures decision support for the protection of hazardous facilities against accidents during operation.

It uses Web-application based on risk assessment by artificial intelligence methods for risk-oriented approach, that takes into account the linguistic criteria for diagnosing technical condition and functional parameters of its local safety system equipped with the electronic key lock.

The main result of using this system is the reduction of accidents rate during operation of a hazardous facility. It occurs due to an increase in the reliability of remote control during the development of recommendations for making precautionary decisions with a decrease in the number of personnel and the inspection staff, including the costs of their maintenance.

The recommendation-based safety system allows to unify and systematize the requirements of supervisory authorities for the operation of machines, and also to make recommendations based on objective data taken at the site, increasing the quality and transparency of the work of the state control services.

Creation of the decision support system for accidents risk assessment at hazardous facilities automates the control process, allows it to be used in remote regions, including those that are difficult to access, increasing the equality of enterprises and regional residents in access to new technologies.

Key word: recommendation-based safety systems, remote control, risk-oriented approach, risk assessment, risk prediction, digital IT systems, mobile applications.

References

1. Draft of the Federal Law «On Industrial Safety». Available at: <https://regulation.gov.ru/projects#npa=92266> (accessed: March 2, 2020). (In Russ.).

2. Korotkiy A.A., Kinzhibalov A.A., Panfilov A.V., Kurilkin D.A. Risk-Oriented Approach to Organization of Supervision Activity in the Field of Industrial Safety. *Bezopasnost*

truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry. 2016. № 2. pp. 58–63. (In Russ.).

3. Korotkiy A.A., Panfilov A.V., Kinzhibalov A.A., Kinzhibalov A.V. Improvement of modern safety systems for tower cranes based on digital technologies under the conditions of risk-oriented supervision. *Nauka i biznes: puti razvitiya = Science and Business: Ways of Development*. 2018. № 7 (85). pp. 46–54. (In Russ.).

4. Khoroshev A.S., Pavlenko A.V., Tchoutchkin D.A., Puzin V.S., Khorosheva E.V., Korotkiy A.A. The use of magnetic marks in steel wire ropes. Available at: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012072/pdf> (accessed: March 2, 2020). (In Russ.).

5. Ye L., Fei Z., Liang J. A method of online safety assessment for industrial process operations based on hopf bifurcation analysis. *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2011. Vol. 50. № 6. pp. 3403–3414. DOI: 10.1021/ie1018854

6. Filin A.E., Zinovieva O.M., Kolesnikova L.A., Merkulova A.M. Prospects of safety control in combination of mining and metallurgy industries. *Eurasian Mining*. 2018. № 1. pp. 31–34.

7. Abdrakhmanov N.Kh., Abdrakhmanova K.N., Vorokhobko V.V., Abdrakhmanova L.K., Basyirova A.R. Development of implementation chart for non-stationary risks minimization management technology based on information-management safety system. *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. Vol. 12. № S6. pp. 7880–7888.

8. Fedosov A.V., Abdrakhmanov N.K., Gaysin E.S., Sharafutdinova G.M., Abdrakhmanova K.N., Shammattova A.A. The use of mathematical models in the assessment of the measurements uncertainty for the purpose of the industrial safety condition anal-

ysis of the dangerous production objects. *International Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2018. Vol. 119. № 10. Spec. Iss. C. pp. 433–437.

9. Tan R.R., Aziz M.K.A., Ng D.K.S., Foo D.C.Y., Lam H.L. Pinch analysis-based approach to industrial safety risk and environmental management. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2016. Vol. 18. № 7. pp. 2107–2117.

10. Bosák M., Štofová L., Szaryszová P., Tarča A., Dugas J., Klapáková K. Improving efficiency in a manufacturing company using the inmotion process. *Quality — Access to Success*. 2019. Vol. 20. № 170. pp. 64–67.

11. Deryushev V.V., Sidelnikova E.G. Generalized indicator of sufficiency for assessment of the technical condition of construction and material handling equipment. *Nauchnoe obozrenie = Science Review*. 2013. № 9. pp. 164–167. (In Russ.).

12. Deryushev V.V., Sidelnikova E.G. The structure and the model for building an integral indicator for construction and handling equipment quality assessment. *Nauchnoe obozrenie = Science Review*. 2013. № 9. pp. 311–313. (In Russ.).

13. Deryushev V.V., Sidelnikova E.G. Selection of the alternative solutions in the presence of risk taking into account the uncertainty factors. *Nauchnoe obozrenie = Science Review*. 2013. № 9. pp. 325–328. (In Russ.).

14. Lagerev A.V., Lagerev I.A., Kanygin P.S., Kinzhibalov A.V., Kinzhibalov A.A., Kobilev A.G., Kotelnikov V.V., Korotkiy A.A., Panfilov A.V. Patent RF. № 2682020. Method of safety remote control during operation of an object based on digital IT systems. Applied: February 22, 2018. Published: March 14, 2019. Bulletin № 8.

Received March 23, 2020

Вышел в свет Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 2 (107) за 2020 г.



В бюллетене представлена информация о работе Управления общепромышленного надзора Ростехнадзора, в том числе сведения об инцидентах, авариях и несчастных случаях, происшедших в 2019 г. на объектах предприятий химического комплекса, химического разоружения и оборонно-промышленного комплекса, объектах транспортирования опасных веществ, а также на взрывопожароопасных объектах хранения и переработки растительного сырья. Также представлена информация из Управления государственного энергетического надзора Ростехнадзора об анализе несчастных случаев со смертельным исходом, уроках, извлекаемых из аварий и несчастных случаев, анализ статистических данных о несчастных случаях со смертельным исходом на объектах, поднадзорных Ростехнадзору, выполненный ФГБОУ МЭИ.

Представлены материалы об итогах работы Управления государственного энергетического надзора Ростехнадзора в 2019 г. и задачах на 2020 г.; о VII Международном промышленном форуме «Территория NDT. Неразрушающий контроль. Испытания. Диагностика».

Подписаться на Информационный бюллетень на 2020 г. можно

- ◆ в редакции — по телефону +7 (495) 620-47-53;
- ◆ в почтовом отделении связи по каталогу ОАО «Агентство «Роспечать» «Газеты. Журналы» (индекс 82684), объединенному каталогу «Пресса России» (индекс 42099);
- ◆ через каталог периодических изданий «Газеты и журналы» ГК «Урал-Пресс» (индекс 82684);
- ◆ в интернет-магазине www.shop.safety.ru.

Приобрести Информационный бюллетень за наличный или безналичный расчет можно по адресу:

105082, Москва, Переведеновский пер., д. 13, строение 14. Заявку и оплаченный счет необходимо отправить по тел/факсу +7 (495) 620-47-53 (многоканальный) или e-mail: ornd@safety.ru.

К вопросу о пожарной опасности аккумуляторных батарей



Г.И. Смелков,
д-р техн. наук, проф.,
гл. науч. сотрудник,
smelkov39@mail.ru



В.А. Пехотиков,
канд. техн. наук, вед. науч.
сотрудник



А.И. Рябиков,
начальник отдела



А.А. Назаров,
зам. начальника отдела

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, Россия

Рассмотрены вопросы пожарной опасности аккумуляторных батарей, дан краткий обзор наиболее распространенных в Российской Федерации аккумуляторов. Как показывает практика, на объектах электроэнергетики, предприятиях химической промышленности и металлургии чаще всего используют свинцово-кислотные аккумуляторные батареи, обладающие наиболее привлекательными показателями по стоимости, качеству, удобству использования и накопленному опыту эксплуатации. Представлены анализ нормативных требований по оценке и рекомендации по обеспечению взрывопожаробезопасности свинцово-кислотных аккумуляторов на основе их испытаний по заявкам различных организаций и заводов-изготовителей.

Ключевые слова: пожарная опасность, профилактика пожаров, электроустановка, взрывопожаробезопасность, аккумуляторная батарея, требования и методы испытаний.

Для цитирования: Смелков Г.И., Пехотиков В.А., Рябиков А.И., Назаров А.А. К вопросу о пожарной опасности аккумуляторных батарей // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 56–62. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62

Введение

В соответствии с требованиями Правил устройства электроустановок [1] электроприемники (электропотребители) по надежности электроснабжения делятся на три категории. Наиболее жесткие требования установлены для электроприемников I категории. Для входящих в нее электроприемников особой группы предусматривается, кроме двух независимых взаимно резервируемых сетевых источников питания, дополнительное электроснабжение от третьего независимого источника, в качестве которого часто используют аккумуляторные батареи (АКБ). Они же могут выступать вторым независимым источником питания для остальных приемников I категории.

Широкое применение АКБ находят в качестве источников питания для мобильных средств связи, компьютерной техники, оборудования объектов общепромышленного и военного назначения. Активно разрабатываются новые типы тяговых батарей, применяемых на железнодорожном транспорте и в электромобилях, в том числе электробусах и т.п.

Распространенные типы стационарных аккумуляторных батарей

Бесперебойное электроснабжение технологически необходимых, а порой и жизненно важных потребителей во многих отраслях промышленности, оборонно-промышленного комплекса, на предприятиях связи, в системах телекоммуникации и т.д. в настоящее время организовано в основном с помощью АКБ. Наиболее подходящие для этих целей и широко распространенные на российском рынке типы стационарных АКБ промышленного назначения: свинцово-кислотные, литийионные, никель-солевые. Самые популярные из них — свинцово-кислотные [2], что объясняется невысокой стоимостью, отработанной технологией производства и большим опытом эксплуатации. Если ранее кислотные АКБ требовали постоянного обслуживания, то в настоящее время используются свинцово-кислотные герметизированные аккумуляторные элементы и моноблоки, снабженные системой рекомбинации водорода (эффективность — свыше 95 %) с клапанами для выпуска газа при превышении давления в аккумуляторе более допустимого уровня. Полной

рекомбинации кислорода и водорода достичь невозможно, поэтому АКБ называют не герметичными, а герметизированными.

При правильном выборе, монтаже и эксплуатации свинцово-кислотные АКБ отвечают требованиям взрывопожарной и пожарной безопасности и допускаются к эксплуатации в помещениях с технологическим оборудованием и обслуживающим персоналом.

Недостатки таких АКБ: малый срок службы (3–5 лет), относительно низкий ресурс по числу циклов заряда-разряда (1000–1200 раз), а также сравнительно большое время заряда. В основном их применяют там, где нет весовых ограничений и, что играет немаловажную роль, требуется обеспечить минимальную стоимость.

В соответствии с ГОСТ Р МЭК 60896-21—2013 [3] и ГОСТ Р МЭК 60896-22—2015 [4] для АКБ необходимо определить и указать в техническом описании следующие характеристики: объем выделяемого газа в условиях нормального флотирующего режима заряда и при перезаряде (для использования разработчиками оборудования или проектировщиками помещений в целях проверки обеспечения достаточного воздухообмена), класс воспламеняемости материалов (для планирования соответствующих мер противопожарной безопасности).

Литийионные АКБ появились на рынке в конце 1990-х годов, и только в 2019 г. работа по их созданию была отмечена Нобелевской премией. Главные преимущества таких АКБ: высокая удельная емкость (на единицу массы или объема батареи), низкий саморазряд, высокое напряжение единичного элемента (3,6 В), небольшая стоимость обслуживания (из-за отсутствия эффекта памяти, требующего периодического выполнения полного разряда и последующего заряда для восстановления емкости). Основные недостатки: высокая цена, узкий диапазон рабочих температур, наличие сложной встроенной системы защиты и контроля заряда и напряжения на каждом аккумуляторе батареи. Область применения: электронные устройства (часы, смартфоны, ноутбуки, планшетные компьютеры), детские игрушки, электрокары (легковые и грузовые) и др. Есть примеры их использования в больших стационарных хранилищах электроэнергии. Вместе с тем ограничения по толщине электродов усложняют конструкцию элементов литийионных батарей [5].

С пожарной точки зрения следует отметить многочисленные случаи воспламенения и взрыва литийионных АКБ [6, 7], при этом наибольшая опасность возникает при их перезаряде [8, 9]. Вторая не менее опасная ситуация — короткое замыкание (КЗ) в аккумуляторе, при отказе защиты за несколько секунд вызывающее вздутие его корпуса, разгерметизацию и возгорание, а часто и взрыв. Подобная неисправность возможна вследствие образования в ячейках АКБ дендритов лития, замыкающих электроды при неправильном цикле заряда или при механическом

повреждении корпуса элемента. Разгерметизация может происходить при высоком (более 90 °С) нагреве аккумулятора с его последующим температурным разгоном. В настоящее время ряд иностранных компаний активно занимается вопросами пожарной безопасности литийионных АКБ. Примером служит исследовательский проект [10].

Еще один тип АКБ — никель-солевые, серийное производство которых для различных отраслей промышленности организовано на одном из предприятий Швейцарии в 1998 г. (позже оно вошло в группу FIAMM Energy Technology S.p.A., Италия). Преимущества этой разновидности АКБ: абсолютная герметичность, экологическая чистота батарей; отсутствие газовыделения на всех режимах работы; значительно более высокие показатели удельной энергоемкости в собранной батарее по сравнению с другими видами АКБ (даже с учетом наличия теплоизоляции и электронного модуля управления); высокий ресурс (около 4500 циклов заряда-разряда); неизменные эксплуатационные свойства в широком диапазоне температур окружающей среды (от –20 до +60 °С); длительные сроки службы и складского хранения даже в полностью разряженном состоянии.

К недостаткам никель-солевых АКБ, способным повлиять на их пожарную безопасность, следует отнести высокотемпературный (около 250 °С внутри АКБ) режим работы. Это связано с особенностью физико-химических процессов, протекающих в аккумуляторе: электролит NaAlCl_4 (температура плавления 157 °С) и отрицательный электрод Na (температура плавления 98 °С) при работе должны находиться в расплавленном состоянии.

Область применения никель-солевых АКБ: энергетические установки (включая альтернативную энергетику), автомобильный и железнодорожный транспорт, объекты связи, системы накопления электроэнергии.

Пожарную безопасность таких АКБ обеспечивают три системы защиты: электрическая, термальная и механическая. Электрическая система выступает основной, защищая от КЗ и длительного воздействия высоких токов нагрузки посредством внутреннего мониторинга и плавких предохранителей. Термическая защита временно отключает батарею, если ее внутренняя температура превысит 350 °С. Механическая защита обеспечивается двойным металлическим контейнером со слоем кремниевой микропористой изоляции, причем элементы герметично упакованы в стальные стаканы.

Тем не менее благодаря сравнительно выигрышному сочетанию ряда показателей наиболее широкое распространение получили свинцово-кислотные АКБ.

Обеспечение взрывопожаробезопасности аккумуляторных батарей

Главное условие применения любого вида АКБ — взрывопожаробезопасность. В течение многих лет

ФГБУ ВНИИПО МЧС России занимается изучением данного вопроса применительно как к самим АКБ, так и к помещениям, в которых они эксплуатируются [11, 12].

С появлением герметизированных клапанно-регулируемых свинцово-кислотных АКБ с внутренней регенерацией водорода их разрешили использовать непосредственно в производственных помещениях с присутствующим персоналом при соблюдении нормативных требований по выбору, монтажу и эксплуатации АКБ.

Общие требования безопасности для всех химических источников тока содержатся в ГОСТ 12.2.007.12—88 [13]. Основные требования этого стандарта: исключение возможности взрыва и самовозгорания (п. 2.5), обеспечение взрывопожаробезопасности изделия (п. 2.13), температура воспламенения материала корпуса должна быть на 20 % выше температуры нагрева материала корпуса при внешнем КЗ (п. 2.15). Также регламентированы испытания аккумуляторов на пожарную опасность (пп. 3.1—3.5). Однако в стандарте, к сожалению, отсутствуют конкретные требования к классу воспламеняемости материалов АКБ.

Короткое замыкание — один из наиболее пожароопасных аварийных режимов, возникающий при эксплуатации АКБ вследствие непреднамеренного замыкания положительных и отрицательных пластин, что может произойти по следующим причинам [14]: разрушение сепараторов, отслоение и осыпание решетки, образование на отрицательных электродах наростов свинца, скопление на дне корпуса батареи большого количества шлама. Характерный признак КЗ — повышенная температура электролита при заряде.

В соответствии с [13] перед испытанием АКБ на пожароопасность необходимо выполнить расчет предельной температуры ее нагрева при КЗ $T_{КЗ}$ во внешней цепи:

$$T_{КЗ} = T_n + AW/(Cm), \quad (1)$$

где T_n — начальная температура аккумулятора, °С; A — безразмерный коэффициент, $A = 3,6$; W — максимальная энергия разряда аккумулятора, Вт·ч; C — удельная теплоемкость аккумулятора, Дж/кг·°С; m — масса изделия, кг.

Как правило, производители указывают значения W и m в технической документации на изделия, а C можно рассчитать как теплоемкость материалов (пластмасса, электролит, свинец), из которых изготовлены компоненты АКБ, пропорционально их объемной или весовой доле:

$$C = \frac{m_{пл}}{m_{пл} + m_{эл} + m_c} C_{пл} + \frac{m_{эл}}{m_{пл} + m_{эл} + m_c} C_{эл} + \frac{m_c}{m_{пл} + m_{эл} + m_c} C_c, \quad (2)$$

где $m_{пл}$, $m_{эл}$, m_c — массы соответственно пластмассы, электролита и свинца; $C_{пл}$, $C_{эл}$, C_c — теплоемкости соответственно пластмассы, электролита и свинца.

Если расчетная температура корпуса АКБ при КЗ превышает температуру воспламенения его материала, то проводят экспериментальную оценку фактического значения данного параметра при КЗ во внешней цепи АКБ, измеряя температуру в наиболее нагретых точках. При этом в ряде случаев происходит пожароопасный перегрев, приводящий к воспламенению корпуса АКБ (рис. 1).



▲ Рис. 1. Открытое пламя при испытании АКБ в режиме КЗ

▲ Fig. 1. Open flame during test of the accumulator battery in short circuit mode

Температура, вычисленная по формуле (1) или полученная экспериментально, должна быть на 20 % ниже температуры воспламенения материала корпуса АКБ. Если данное требование не выполняется, то в конструкции изделий необходимо предусмотреть предохранители или другие устройства, отключающие источники тока от внешней цепи при КЗ в ней.

Класс воспламеняемости материалов АКБ определяют путем проведения огневых испытаний по ГОСТ 28779—90 (МЭК 707—81) [15]. Воспламеня-

емость — это способность полимерного материала элемента конструкции АКБ гореть с образованием пламени. В соответствии с [15] существуют два метода классификации полимерных материалов по воспламеняемости при воздействии пламени:

FN (ПГ). Пламя. Горизонтальный образец;

FV (ПВ). Пламя. Вертикальный образец.

Как следует из названий, они различаются положением образцов при испытании и подходами при оценке результатов.

Методом FN (ПГ) находят скорость распространения пламени по образцу и длину его поврежденной части. По способности противостоять распространению пламени испытываемые материалы разделяют на три класса: FN (ПГ) 1 (высший), FN (ПГ) 2 и FN (ПГ) 3.

Метод FV (ПВ) позволяет определить продолжительность самостоятельного горения и тления образцов, образование горящих капель и их способность воспламенить горючий слой (вату). Материалы относят к трем классам: FV (ПВ) 0 (соответствует наименьшей пожароопасности), FV (ПВ) 1 и FV (ПВ) 2.

Метод FV (ПВ) более жесткий из-за вертикального расположения испытываемого образца. В большинстве случаев материал бака и крышки АКБ при таких испытаниях сгорал до крепящего зажима (рис. 2), что недопустимо и делает невозможной классификацию этого материала данным способом.



▲ Рис. 2. Испытание образца материала бака АКБ методом FV (ПВ)
▲ Fig. 2. Testing the sample of the accumulator batteries material by FV (PV) method

Специфика взрывопожарной и пожарной опасности свинцово-кислотных АКБ и аккумуляторных помещений в основном связана с выделением газообразного водорода при заряде АКБ. К сожалению, действующие нормы [1, 3, 4, 13, 16–18] не содержат конкретных требований по этому поводу. В [16] ограничение выделения водорода регламентировано так: «При рекомендуемых условиях эксплуатации количество выделяемого водорода из аккумулято-

ров и батарей должно быть достаточно низким для того, чтобы они могли использоваться, например, в служебных или производственных помещениях». По указанной причине при выборе типоразмера АКБ, установлении возможности и условий их применения в конкретном помещении определяют его категорию взрывопожаробезопасности в соответствии с требованиями СП 12.13130.2009 [19], исходя из данных изготовителя АКБ о количестве выделяемого аккумуляторами водорода при их аварийном заряде с учетом свободного объема помещения.

Классификацию аккумуляторного помещения проводят путем последовательной проверки его принадлежности от высшей категории (А) к низшей (Д). Критерием отнесения к взрывопожароопасным категориям А и Б выступает расчетное избыточное давление взрыва в помещении $\Delta P > 5$ кПа, которое вычисляют по формуле:

$$\Delta P = (P_{\max} - P_0) \frac{m_b z}{V_{\text{св}} \rho} \frac{100}{C_{\text{ст}}} \frac{1}{K_n}, \quad (3)$$

где P_{\max} — максимальное давление при сгорании стехиометрической водородовоздушной смеси в замкнутом объеме, кПа (при отсутствии данных допускается принимать $P_{\max} = 900$ кПа); P_0 — начальное (атмосферное) давление, кПа (допускается принимать $P_0 = 101$ кПа); m_b — масса водорода, выделившегося в помещение в результате расчетной аварии, кг; z — коэффициент участия горючих газов и паров в горении (для водорода принимают $z = 1$); $V_{\text{св}}$ — свободный объем помещения, м³; ρ — плотность водорода при расчетной температуре, кг/м³; $C_{\text{ст}}$ — стехиометрическая концентрация водорода, % об.; K_n — коэффициент, учитывающий негерметичность помещения и неадиабатичность процесса горения (допускается принимать $K_n = 3$).

Порядок расчета необходимой производительности вентиляции для обеспечения взрывопожаробезопасности устанавливает СП 60.13330.2016 [20]. Расход L приточного воздуха для обеспечения соответствия нормам взрывопожаробезопасности определяют по формуле:

$$L = L_{\text{вз}} + \frac{m_{\text{п}} - L_{\text{вз}} (0,1q_g - q_{\text{in}})}{0,1q_g - q_{\text{in}}}, \quad (4)$$

где $L_{\text{вз}}$ — расход воздуха, удаленного из обслуживаемой или рабочей зоны местными системами вентиляции, м³/ч; $m_{\text{п}}$ — расход пожароопасного вещества (водород), поступающего в воздух помещения, мг/ч; q_g — нижний концентрационный предел распро-

странения (НКПР) пламени по газопаровоздушной смеси, $\text{мг}/\text{м}^3$; q_m — концентрация взрывопожароопасного вещества в воздухе, подаваемом в помещение, $\text{мг}/\text{м}^3$.

Для АКБ, состоящих из n элементов, имеем:

$$m_{\text{н}} = nW_{\text{в}}, \quad (5)$$

где $W_{\text{в}}$ — скорость выделения водорода из одного элемента АКБ, $\text{мг}/\text{ч}$.

Согласно [20] для водорода $q_g = 4\%$ об., при этом требуется, чтобы концентрация q_L , % об., горючих газов в помещении не превышала 0,1 НКПР:

$$q_L = 0,1q_g = 0,4.$$

При отсутствии принудительной вентиляции $L_{\text{вз}} = 0$; $q_{\text{ин}} = 0$. Тогда, выполнив преобразования, получим:

$$L = nW_{\text{в}} \cdot 100/0,4. \quad (6)$$

Подставляя исходные данные изготовителей АКБ о скорости выделения водорода, рассчитывают необходимый расход воздуха для обеспечения заданной взрывопожаробезопасности помещения.

В соответствии с [1] помещения, где заряжают свинцово-кислотные АКБ при напряжении более 2,3 В на элемент, должны быть оборудованы стационарной принудительной приточно-вытяжной вентиляцией. Кроме того, здесь требуется организовать естественную вытяжную вентиляцию, обеспечивающую не менее одной полной замены всего объема воздуха в час.

Заключение

Аккумуляторы — важнейший вид электрооборудования в системах альтернативного бесперебойного питания электропотребителей, применяемого в первую очередь в качестве аварийного источника электроэнергии для систем пожарной безопасности объектов. В результате проведенных исследований установлено, что температура нагрева аккумуляторной батареи в режиме короткого замыкания, как правило, не превышает допустимых значений. Однако в ряде случаев отмечено оплавление и даже воспламенение баков и крышек аккумуляторной батареи. Испытания показали, что практически все аккумуляторные батареи изготовлены из материалов, подерживающих и распространяющих горение.

Действующие нормативные документы задают правильные и обоснованные направления оценки взрывопожаробезопасности аккумуляторов с точки зрения объема выделяемого газа в условиях нормального флотирующего режима заряда и при перезаряде, определения класса воспламеняемости материалов и превышения температуры при коротком замыкании в целях планирования соответствующих мер противопожарной безопасности. Критерии оценки пожаро-

опасности аккумуляторных батарей сформулированы в общем виде. Информации, содержащейся в технической документации, часто недостаточно. Например, там не указываются теплоемкость аккумуляторной батареи, класс воспламеняемости материалов, из которых она изготовлена, температуры их воспламенения. Необходимо дальнейшее совершенствование нормативной базы с установлением обоснованных требований и критериев оценки взрывопожароопасности аккумуляторных батарей с учетом типа их исполнения, конструктивных особенностей и условий эксплуатации. В частности, для аккумуляторных батарей, применяемых в системах бесперебойного питания, необходимо установить требования к классу материалов по воспламеняемости на уровне FV (ПВ) 0, регламентировать допустимое значение температуры нагрева при коротком замыкании, ввести испытание нагретой проволокой аккумуляторных батарей, из которых невозможно изготовить образцы для испытаний материалов методом FV (ПВ).

Достижению указанных целей может способствовать создание необходимого в настоящее время единого нормативного документа, например, стандарта «Аккумуляторные установки. Требования взрывопожарной безопасности», который объединял бы все соответствующие требования различных стандартов, сводов правил и строительных норм.

Список литературы

1. *Правила устройства электроустановок*. Все действующие разделы шестого и седьмого изданий с изменениями и дополнениями по состоянию на 1 февраля 2016 года. — М.: КноРус, 2016. — 488 с.
2. *Тимонин И.* Сравнение аккумуляторных батарей различного типа для применения в сетевых накопителях энергии// *Электроэнергия. Передача и распределение*. — 2014. — № 2 (23). — С. 78–80.
3. *ГОСТ Р МЭК 60896-21—2013*. Батареи свинцово-кислотные стационарные. Часть 21. Типы с регулирующим клапаном. Методы испытаний. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200108021> (дата обращения: 05.02.2020).
4. *ГОСТ Р МЭК 60896-22—2015*. Батареи свинцово-кислотные стационарные. Часть 22. Типы с регулирующим клапаном. Требования. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200129510> (дата обращения: 05.02.2020).
5. *Divya K.C., Østergaard J.* Battery Energy Storage Technology for power systems — An overview// *Electric Power Systems Research*. — 2009. — Vol. 79 (4). — P. 511–520. DOI: 10.1016/j.epr.2008.09.017
6. *Events with smoke, fire, extreme heat or explosion involving lithium batteries*. URL: https://www.faa.gov/hazmat/resources/lithium_batteries/media/Battery_incident_chart.pdf (дата обращения: 05.02.2020).
7. *Dramatic CCTV footage shows e-cigarette battery exploding in man's pocket — prompting storage warning from fire services*. URL: <https://www.telegraph.co.uk/news/2016/12/22/dramatic-cctv-footage-shows-e-cigarette-battery-exploding-mans/> (дата обращения: 05.02.2020).

8. Плотников В.Г., Чешко И.Д., Кондратьев С.А. Пожарная опасность литий-ионных аккумуляторов и низковольтных источников питания на их основе. URL: <http://rassledovanie.fire-expert.spb.ru/sites/default/files/СБОРНИК%20№4-53-58.pdf> (дата обращения: 05.02.2020).

9. *Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies*/ Lingxi Kong, Chuan Li, Jiuchun Jiang, M.G. Pecht. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2191/pdf> (дата обращения: 05.02.2020). DOI: 10.3390/en11092191

10. *Firefighter Safety in Battery Energy Storage System Fires*. URL: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Resources/Research-Foundation/Current-projects/ProjectSummaryESS FirefighterSafety.ashx> (дата обращения: 05.02.2020).

11. Смелков Г.И., Пехотиков В.А. Химические источники тока. Требования пожаровзрывобезопасности// Пожарная безопасность. — 1999. — № 2. — С. 48–56.

12. *Пожарная безопасность аккумуляторных батарей*/ В.А. Пехотиков, Г.И. Смелков, А.И. Рябиков, О.И. Грузинова// Актуальные проблемы пожарной безопасности: материалы XXVII науч.-практ. конф. В 3 ч. Ч. 1. — М.: ВНИИПО, 2015. — С. 321–329.

13. *ГОСТ 12.2.007.12–88. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Источники тока химические. Требования безопасности*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200000276> (дата обращения: 05.02.2020).

14. *Атабеков В.Б. Ремонт электрооборудования промышленных предприятий: учеб.* — 5-е изд., испр. — М.: Высшая школа, 1985. — 175 с.

15. *ГОСТ 28779–90 (МЭК 707–81). Материалы электроизоляционные твердые. Методы определения воспламеняемости под воздействием источника зажигания*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200011992> (дата обращения: 05.02.2020).

16. *ГОСТ Р МЭК 896-1–95. Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытаний. Часть 1. Открытые типы*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200026933> (дата обращения: 05.02.2020).

17. *ГОСТ Р МЭК 60896-2–99. Свинцово-кислотные стационарные батареи. Общие требования и методы испытаний. Часть 2. Закрытые типы*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200026936> (дата обращения: 05.02.2020).

18. *ГОСТ Р МЭК 61056-1–2012. Батареи свинцово-кислотные общего назначения (типы с регулирующим клапаном). Часть 1. Общие требования, функциональные характеристики. Методы испытаний*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200095388> (дата обращения: 05.02.2020).

19. *СП 12.13130.2009. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (дата обращения: 05.02.2020).

20. *СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. Актуализированная редакция СНиП 41-01–2003*. URL: <http://docs.cntd.ru/document/456054205> (дата обращения: 05.02.2020).

smelkov39@mail.ru

Материал поступил в редакцию
14 февраля 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 56–62.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-56-62

To the Issue of Accumulator Batteries Fire Safety

G.I. Smelkov, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Chief Research Associate, smelkov39@mail.ru

V.A. Pekhotikov, Cand. Sci. (Eng.), Lead Researcher

A.I. Ryabikov, Head of the Department

A.A. Nazarov, Deputy Head of the Department

FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia

Abstract

The current problem of ensuring explosion and fire safety of the accumulator batteries is considered in the article. At many facilities, including for industrial purpose, they are used as uninterruptible emergency power supply for fire protection systems, as well as the networks supplying power consumers of the first category on the reliability of power supply (and the special group included in it).

Analytical summary is presented that shows the advantages and disadvantages of the most commonly used types of batteries in Russia from the point of view of their explosion and fire safety. According to the statistics, the lead-acid accumulator batteries are widely used most of all.

The requirements applied for explosion and fire safety of accumulator installations, as well as the methods for its assessment and ensuring, are reviewed in detail. Inconsistency of the requirements of the regulatory documents at various levels (standards, set of rules, departmental norms and rules) is noted, which makes it difficult to control the production of the accumulator batteries, their proper selection for use at the facilities and further operation. Analytical methods for explosion and fire safety assessment in emergency short circuit conditions were studied when analyzing the explosion hazard parameters of hydrogen mixture with air in order to categorize the rooms with the installed batteries. The approaches are analyzed concerning the calculation of the ventilation systems for ensuring compliance of these premises with explosion and fire safety norms.

Practical significance of the work is in studying the results of many years of the accumulator batteries experimental studies for compliance with the requirements of GOST 12.2.007.12–88. Specific evidence-based recommendations were developed on increasing the explosion and fire safety of batteries in real operating conditions.

The proposal was made on creating the single normative document regulating fire safety requirements of battery installations and their test methods. This initiative is based on the vast experience of the authors in this area and the widespread practice of using the current regulatory framework.

Key words: fire prevention from electrical installations, explosion and fire safety of the accumulator batteries, requirements and test methods.

References

1. Rules for designing electric installations. All the current sections of the sixth and seventh editions with amendments and

additions as of February 1, 2016. Moscow: KnoRus, 2016. 488 p. (In Russ.).

2. Timonin I. Comparison of different types of the accumulator batteries for use in the network powerblock. *Elektroenergiya. Peredacha i raspredelenie = Electrical power. Transmission and distribution*. 2014. № 2 (23). pp. 78–80. (In Russ.).

3. GOST R MEK 60896-21—2013. Stationary lead-acid batteries. Part 21. Valve regulated types. Methods of test. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200108021> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

4. GOST R MEK 60896-22—2015. Stationary lead-acid batteries. Part 22. Valve regulated types. Requirements. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200129510> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

5. Divya K.C., Østergaard J. Battery Energy Storage Technology for power systems — An overview. *Electric Power Systems Research*. 2009. Vol. 79 (4). pp. 511–520. DOI: 10.1016/j.epsr.2008.09.017

6. Events with smoke, fire, extreme heat or explosion involving lithium batteries. Available at: https://www.faa.gov/hazmat/resources/lithium_batteries/media/Battery_incident_chart.pdf (accessed: February 5, 2020).

7. Dramatic CCTV footage shows e-cigarette battery exploding in man's pocket — prompting storage warning from fire services. Available at: <https://www.telegraph.co.uk/news/2016/12/22/dramatic-cctv-footage-shows-e-cigarette-battery-exploding-mans/> (accessed: February 5, 2020).

8. Plotnikov V.G., Cheshko I.D., Kondratev S.A. Fire hazard of lithium-ion batteries and low-voltage power sources based on them. Available at: <http://rassledovanie.fire-expert.spb.ru/sites/default/files/СБОРНИК%20№4 -53-58.pdf> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

9. Kong Lingxi, Li Chuan, Jiang Jiuchun, Pecht M.G. Li-Ion Battery Fire Hazards and Safety Strategies. Available at: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/9/2191/pdf> (accessed: February 5, 2020). DOI: 10.3390/en11092191

10. Firefighter Safety in Battery Energy Storage System Fires. Available at: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Resources/Research-Foundation/Current-projects/ProjectSummaryESSFirefighterSafety.ashx> (accessed: February 5, 2020).

11. Smelkov G.I., Pekhotikov V.A. Chemical current source. Requirements for fire and explosion safety. *Pozharnaya bezopasnost = Fire safety*. 1999. № 2. pp. 48–56. (In Russ.).

12. Pekhotikov V.A., Smelkov G.I., Ryabikov A.I., Gruzinoва O.I. Accumulator fire safety of batteries. *Aktualnye problemy pozharnoy bezopasnosti: materialy XXVII nauch.-prakt. konf* (Current fire safety issues: Materials of the XXVII scientific-practical conference). In 3 parts. Pt. 1. Moscow: VNIPO, 2015. pp. 321–329. (In Russ.).

13. GOST 12.2.007.12—88. Occupational safety standards system. Chemical sources of electric energy. Safety requirements. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200000276> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

14. Atabekov V.B. Repair of industrial enterprises electrical equipment: Textbook. 5-e izd., ispr. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 175 p. (In Russ.).

15. GOST 28779—90 (MEK 707—81). Solid electrical insulating materials. Test methods for determination of flammability when exposed to an igniting source. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200011992> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

16. GOST R MEK 896-1—95. Stationary lead-acid batteries. General requirements and methods of tests. Part 1. Vented types. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200026933> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

17. GOST R MEK 60896-2—99. Stationary lead-acid batteries. General requirements and methods of test. Part 2. Valve regulated types. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200026936> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

18. GOST R MEK 61056-1—2012. General purpose lead-acid batteries (valve-regulated types). Part 1. General requirements, functional characteristics. Methods of test. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200095388> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

19. SP 12.13130.2009. Determination of categories of rooms, buildings and external installations on explosion and fire hazard. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200071156> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

20. SP 60.13330.2016. Heating, ventilation and air conditioning. Updated version of SNiP 41-01—2003. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/456054205> (accessed: February 5, 2020). (In Russ.).

Received February 14, 2020

ВНИМАНИЕ! ПОДПИСКА

ДЛЯ СТРАН СНГ И БАЛТИИ

Подписка на журнал

«Безопасность труда в промышленности» и Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору для стран СНГ и Балтии проводится только в редакции журнала.

Телефон отдела подписки:
+7 (495) 620-47-53
(многоканальный)

E-mail: ornd@safety.ru

Почтовый адрес редакции:

Переведеновский пер.,
д. 13, стр. 14, а/я 38, Москва, 105082



Правила оформления и опубликования статей в журнале «Безопасность труда в промышленности»

1. Представляемые в журнал статьи должны сопровождаться лицензионным договором о передаче ЗАО НТЦ ПБ (издатель журнала) неисключительных авторских прав. Образец лицензионного договора размещен на сайте журнала www.btpnadzor.ru. Его можно получить по электронной почте (redbtp@safety.ru).
2. В связи с требованием Высшей аттестационной комиссии (ВАК) Министерства образования и науки Российской Федерации (информационное сообщение от 14 октября 2008 № 45.1-132) о необходимости размещения журналов, входящих в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов ВАК, в открытом доступе в сети Интернет (в базе данных Российской универсальной научной электронной библиотеки) и наполнения базы данных Российского индекса научного цитирования и других баз данных научного цитирования статья должна содержать: индекс по универсальной десятичной классификации (УДК); имя, отчество (полностью) и фамилию автора (авторов), место работы и занимаемую должность; ученую степень или звание; название; аннотацию; ключевые слова; текст статьи; список литературы; иллюстрации и подписанные фотографии авторов (TIF, JPG); контактную информацию (адрес электронной почты).
3. Статья, присылаемая в редакцию, должна иметь сопроводительное письмо от организации, в которой работают авторы (или хотя бы первый автор).
4. Объем статьи (включая иллюстрации, таблицы и список литературы) не должен превышать 12 страниц машинописного текста. Текст статьи должен быть напечатан через 1,5 интервала в редакторе WinWord (шрифт Times New Roman, кегль 12) на одной стороне стандартного листа формата А4.
5. Статья, подписанная автором (авторами), должна быть представлена в электронном (файл WinWord) и в распечатанном виде. Также возможно предоставлять статью на электронном носителе.
6. Материал статьи должен быть изложен кратко, без повторов данных таблиц и рисунков в тексте; на литературу, таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Статья должна быть четко структурирована: введение (обзор проблем, цель работы); теория вопроса; подробное изложение методики проведения опытов, описание материалов и методов анализа, желательна статистическая обработка; обсуждение результатов; заключение. Для статей производственного характера достаточно сделать разделы «Цель работы» и «Полученные результаты».
7. Авторами являются лица (как правило, не более четырех), принимавшие участие во всей работе или в ее главных разделах. Лица, участвовавшие в работе частично, указываются в ссылке на первой странице статьи или в примечании в конце статьи. По каждому из авторов должны быть приложены на русском и английском языках подробные сведения (место работы, должность, ученая степень, ученое звание, e-mail, телефон, почтовый адрес, указан автор, являющийся контактным лицом).
8. Статья должна в обязательном порядке иметь реферат, ключевые слова и список литературы.
9. Реферат к статье (в соответствии с требованиями международных баз данных) должен достаточно полно раскрывать ее содержание (но не быть калькой с русскоязычной аннотации), иметь объем в среднем 1800–2000 символов. Реферат должен быть переведен на английский язык.
10. Ключевые слова должны содержать в среднем не менее 7–10 наименований и также должны быть переведены на английский язык.
11. Список литературы статьи (в соответствии с требованиями международных баз данных) должен соответствовать требованиям ГОСТ Р 7.0.5—2008 и иметь не менее 12 источников (из них не более 3 ссылок на собственные работы) с обязательным включением как минимум 5 источников позднее 2010 г. и не менее 4 ссылок на зарубежные исследования последних лет.
12. Единицы измерения величин должны соответствовать Международной системе единиц (СИ), а используемые в статье термины, определения и основные обозначения — действующим ГОСТам.
13. Список литературы должен содержать следующие сведения: при ссылке на журнальную статью — фамилию и инициалы автора, название статьи, полное название журнала, год издания, том, номер, страницы начала и конца статьи; при ссылке на книгу — фамилию и инициалы автора, название произведения, место издания, издательство (для иностранного источника достаточно указать город), год издания, общее число страниц в книге; при ссылке на статью в сборнике — фамилию и инициалы автора, название статьи, название сборника, номер выпуска или тома, место издания, издательство (или издающая организация), страницы начала и конца статьи; для интернет-ссылок — название ресурса и публикации, режим доступа.
14. Номер литературной ссылки дается в квадратных скобках в соответствующем месте текста в порядке возрастания.
15. При составлении списков литературы авторам рекомендуется использовать надежные верифицируемые источники и избегать ссылок на публичные ресурсы, информация из которых не может иметь авторитетного подтверждения (например, «Википедия»).
16. Перед отправкой статьи в редакцию журнала авторам необходимо проверить текст статьи на предмет отсутствия возможных заимствований из других публикаций с помощью специальной программы (например, www.text.ru).
17. Формулы должны быть набраны в редакторе формул. После формулы следует пояснить входящие в нее параметры в последовательности их упоминания с указанием единиц измерения.
18. Рисунки также представляются отдельными файлами (не вставлены в WinWord): тоновые — в растровом формате (TIF, JPG, разрешение не ниже 300 dpi), графический материал — в векторном формате (WMF, EPS и т.д.) или файлами с расширением, соответствующим графическим редакторам, в которых они выполнены. Рисунки должны быть четкими, пригодными для компьютерного воспроизведения. Не следует перегружать их второстепенными данными, не имеющими прямого отношения к тексту статьи. Цветные фотографии желательно сопровождать подписями.
19. С авторов научно-технических статей, включая аспирантов, за публикацию их рукописей плата не взимается. Вознаграждение авторам не выплачивается. Электронная версия журнала с опубликованной статьей высылается каждому автору на его электронную почту.
20. Статьи рецензируются. Отрицательные рецензии доводятся до сведения авторов.
21. Материалы, представленные в редакцию, авторам не возвращаются.
22. Автор, коллектив авторов присылаемой статьи гарантируют, что данная статья не была ранее опубликована и не находится на рассмотрении в редакции других журналов.
23. Обращаем внимание авторов, что с 2017 г. для статей, публикуемых в журнале, в соответствии с требованиями международных баз данных издатель закупает и присваивает уникальные идентификационные номера DOI (HYPERLINK "https://en.wikipedia.org/wiki/digital_object_identifier"). Подробную информацию о порядке присвоения DOI можно уточнить в редакции.
24. Расширенные требования к авторам, оформлению статей, условия рецензирования, этические основы редакционной политики представлены на сайте журнала www.btpnadzor.ru.

Методология распределения объектов защиты по категориям риска причинения вреда (ущерба) объектам защиты в результате пожара



А.В. Матюшин,
д-р техн. наук, гл. науч.
сотрудник,
gnsmatyushin@mail.ru



А.Г. Фирсов,
канд. техн. наук, зам.
начальника отдела



Ю.А. Матюшин,
канд. техн. наук, начальник
отдела



В.С. Гончаренко,
науч. сотрудник

ФГБУ ВНИИПО МЧС России, Балашиха, Россия

Проанализированы положения законопроекта, регламентирующие требования к критериям отнесения объектов контроля к категориям риска причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям в результате наступления негативных событий. Предложена математическая модель для расчетного определения уровня противопожарной защиты зданий (сооружений) различного класса функциональной пожарной опасности. Рассчитаны значения уровня противопожарной защиты зданий (сооружений) различного класса функциональной пожарной опасности. Объекты контроля (объекты защиты) распределены по категориям риска причинения вреда (ущерба) в зависимости от расчетного значения их уровня противопожарной защиты. Предложены оптимальные сроки проведения плановых проверок объектов контроля в зависимости от категории риска, к которой отнесены объекты контроля. Сформулированы предложения по совершенствованию риск-ориентированного подхода в деятельности органов государственного пожарного надзора МЧС России.

Ключевые слова: контрольно-надзорный орган, риск причинения вреда, категория риска, ущерб, органы государственного надзора, объекты контроля, критерий, вероятность причинения вреда, уровень противопожарной защиты, класс функциональной пожарной опасности.

Для цитирования: Матюшин А.В., Фирсов А.Г., Матюшин Ю.А., Гончаренко В.С. Методология распределения объектов защиты по категориям риска причинения вреда (ущерба) объектам защиты в результате пожара // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 64–72. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-64-72

Введение

Федеральным законом от 26 декабря 2008 г. № 294-ФЗ «О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля» [1], постановлением Правительства Российской Федерации (РФ) от 12 апреля 2012 г. № 290 «О федеральном государственном пожарном надзоре» [2] и проектом Федерального закона «О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации» [3] установлено, что контрольно-надзорный орган для целей управления рисками причинения вреда (ущерба) при выполнении государственного контроля (надзора), муниципального контроля относит объекты

контроля (объекты защиты) к одной из следующих категорий риска причинения вреда (ущерба): чрезвычайно высокий риск, высокий, значительный, средний, умеренный, низкий.

Положением о виде государственного контроля (надзора), муниципального контроля должно быть предусмотрено не менее трех категорий риска причинения вреда (ущерба), в том числе в обязательном порядке категория низкого риска причинения вреда (ущерба).

В соответствии с положениями законопроекта [3] критерии отнесения объектов контроля к категориям риска причинения вреда (ущерба) должны формироваться по результатам оценки риска причинения вреда (ущерба). При этом указанные критерии

должны основываться на необходимости предупреждения и минимизации причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям при оптимальном использовании материальных, финансовых и кадровых ресурсов контрольно-надзорного органа государственного пожарного надзора.

Критерии отнесения объектов контроля к категориям риска причинения вреда (ущерба) должны учитывать тяжесть и вероятность причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям в результате наступления негативных событий, а также вероятность несоблюдения контролируруемыми лицами обязательных требований.

Кроме того, критерии отнесения объектов контроля к категориям риска причинения вреда (ущерба) должны основываться на достоверных сведениях, характеризующих уровень риска причинения вреда (ущерба) в соответствующей сфере, а также практику соблюдения обязательных требований в рамках вида контроля, и обеспечивать возможность контролируемому лицу самостоятельно оценивать правомерность отнесения его деятельности и (или) принадлежащих ему (используемых им) иных объектов контроля к соответствующей категории риска причинения вреда (ущерба).

При определении критериев риска причинения вреда (ущерба) оценка вероятности наступления негативных событий, влекущих причинение вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям, должна проводиться согласно законопроекту [3] исходя из предшествующих данных о фактическом причинении вреда (ущерба) вследствие наступления событий, вызванных определенными источниками и причинами риска причинения вреда (ущерба), по различным видам объектов контроля с выделением видов объектов контроля, характеризующихся схожей и различной частотой случаев фактического причинения вреда (ущерба).

Риск-ориентированное регулирование активно внедряется в деятельность контрольно-надзорных органов не только в России, но и в ряде развитых стран мира, в том числе в США, Канаде, Великобритании, ЮАР, странах Европейского союза и Содружества Независимых Государств. Наиболее активно реформирование контрольно-надзорных органов разных стран мира началось в 2005 г. после опубликования доклада Ф. Хэмптона «Сокращение административных барьеров: эффективность при проведении проверок и осуществлении контроля-надзора» [4]. Дальнейшим толчком для развития этого направления послужила работа профессора Лондонской школы экономики и политических наук Д. Блэк «Регулирование на основе риска: выбор, практика и извлеченные уроки» [5], которая предложила балльную модель риск-ориентированного подхода, позволяющую рационально распределить ограниченные ресурсы надзорных органов по объектам контроля. Особенности риск-ориентированного

регулирования деятельности контрольно-надзорных органов подробно рассмотрены в работах [6, 7].

Как правило, распределение объектов контроля по категориям риска и обоснование периодичности их проверок осуществляются в развитых странах мира в зависимости либо от балльной оценки риска, либо от числа и важности выявленных при проверке объекта контроля нарушений обязательных требований пожарной безопасности [7].

До настоящего времени в России распределение зданий и сооружений различного класса функциональной пожарной опасности (ФПО) [8] по категориям риска выполнялось на основании практического опыта деятельности органов федерального государственного пожарного надзора МЧС России (далее — органов ГПН МЧС России) с использованием статистической информации о пожарах и их последствиях. При этом никакой математический аппарат не использовался [9], а анализ статистической информации проводился посредством визуального сопоставления статистических показателей между собой. Поэтому эта классификация объектов защиты постоянно подвергалась критике и периодической корректировке, так как в зависимости от того, к какой категории риска был отнесен объект защиты, определялась периодичность его проверок.

Поэтому разработка математического аппарата для расчетного определения критерия отнесения объектов контроля к различным категориям риска причинения вреда (ущерба) весьма актуальна. При этом в качестве исходных данных для проведения таких расчетов наиболее целесообразно использовать статистическую информацию о пожарах и их последствиях.

Разработка метода оценки критерия отнесения объектов контроля к категориям риска причинения вреда (ущерба)

Применительно к деятельности органов ГПН МЧС России для получения интегрального критерия риска причинения вреда (ущерба) следует учитывать несколько рисков различных видов: риск причинения материального ущерба в результате пожара, риск гибели людей при пожаре, риск травмирования людей при пожаре, которые измеряются в различных единицах последствий. Для формирования и оценки интегрального критерия риска причинения вреда (ущерба) можно было бы воспользоваться классическими методами оценки риска, изложенными в работах [10–14]. Однако главной проблемой при интегральной оценке нескольких рисков является отсутствие единой единицы их измерения [14]. В то же время эту проблему можно решить введением эквивалентных оценок рисков, исчисляемых в денежных единицах, так как главным результатом управления рисками считается минимизация экономических потерь (в данном случае от пожаров). Для этого необходимо знать эквивалентную стоимость гибели человека и получения им травмы при пожаре.

Другая проблема — для каждого вида риска существуют свои допустимый уровень и шкала рисков, частот и последствий, каждая из которых имеет свой интервал значений и масштаб. Поэтому интегральная оценка рисков не может быть представлена в виде матрицы рисков. В таких случаях результаты интегральной оценки рисков можно было бы представить на одномерной шкале с унифицированным масштабом. Однако для построения такой шкалы рисков необходимо знать допустимый уровень для каждого из рассматриваемых видов риска. К сожалению, для риска причинения материального ущерба в результате пожара и риска получения человеком травмы при пожаре значения допустимых уровней риска в настоящее время не установлены. Кроме того, построению унифицированной шкалы рисков препятствует отсутствие информации по числу зданий (сооружений) различного вида в стране, необходимой для оценки вероятности возникновения пожара в зданиях (сооружениях) различного функционального назначения. Таким образом, использование классических методов для формирования и оценки интегрального критерия риска причинения вреда (ущерба) в целях распределения зданий (сооружений) по категориям риска причинения вреда (ущерба) в результате пожара и обоснования периодичности проведения плановых проверок органами ГПН МЧС России в настоящее время не представляется возможным.

Поэтому применительно к деятельности контрольно-надзорных органов государственного пожарного надзора в качестве критерия отнесения объектов контроля к категориям риска причинения вреда (ущерба) целесообразно выбрать уровень противопожарной защиты зданий (сооружений) различного класса ФПО. При этом понятие уровня противопожарной защиты зданий (сооружений) должно включать в себя информацию о вероятности (частоте) возникновения и развития пожара, степени опасности для жизни (здоровья) людей и размерах возможного материального ущерба. Впервые использование уровня противопожарной защиты зданий (сооружений) для их группировки по пожарной опасности предложено в работе [15].

Оценка уровня противопожарной защиты зданий (сооружений) различного класса ФПО может быть проведена на основе статистической информации о пожарах и их последствиях по формуле:

$$Y_i = \left(\frac{C_{цi} - C_{у.цi}}{C_{цi}} \right) \frac{n_i}{n} = \left(1 - \frac{C_{у.цi}}{C_{цi}} \right) \frac{n_i}{n}, \quad (1)$$

где Y_i — уровень противопожарной защиты зданий i -го класса ФПО; $C_{цi}$ — стоимость ценностей, находившихся в сгоревших за год зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО до пожара, руб.; $C_{у.цi}$ — стоимость ценностей, уничтоженных в сгоревших за год зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО при пожаре

(прямой ущерб от пожаров за год), руб.; n_i — число пожаров в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО в течение года; n — число пожаров в зданиях (сооружениях) всех классов ФПО в течение года (общее число пожаров в стране за год); n_i/n — частота возникновения пожаров в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО в общей статистической выборке происшедших пожаров в течение года.

Структура и содержание формулы (1) наиболее полно отвечают требованиям к критерию отнесения объектов контроля к категориям риска причинения вреда (ущерба), сформулированным в законопроекте [3].

Анализ (1) показывает, что отношение n_i/n всегда меньше или равно единице. Поэтому уровень противопожарной защиты зданий (сооружений) определяется в основном отношением $C_{у.цi}/C_{цi}$. Чем оно ближе к единице (чем большая часть ценностей, находящихся в здании, будет уничтожена при пожаре), тем ниже (хуже) уровень противопожарной защиты зданий (сооружений).

Стоимость ценностей, находившихся в сгоревших за год зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО до пожара $C_{цi}$, может быть рассчитана по формуле:

$$C_{цi} = C_{м.цi} + C_{лi} = (C_{у.м.цi} + C_{с.м.цi}) + (C_{п.лi} + C_{с.лi} + C_{э.лi}), \quad (2)$$

где $C_{м.цi}$ — стоимость материальных ценностей, находившихся в сгоревших за год зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО до пожара, руб.; $C_{лi}$ — денежный эквивалент стоимости людей, находившихся в сгоревших за год зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО до пожара, руб.; $C_{у.м.цi}$ — стоимость материальных ценностей, уничтоженных пожарами в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО за год (прямой ущерб от пожаров за год), руб.; $C_{с.м.цi}$ — стоимость материальных ценностей, спасенных при тушении пожаров в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО за год, руб.; $C_{п.лi}$ — затраты государства на компенсацию родным и близким погибших при пожарах людей в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО (денежный эквивалент стоимости погибших при пожаре людей) за год, руб.; $C_{с.лi}$ — денежный эквивалент стоимости спасенных при пожарах людей в зданиях i -го класса ФПО за год, руб.; $C_{э.лi}$ — денежный эквивалент стоимости эвакуированных из зданий (сооружений) i -го класса ФПО при пожарах людей за год, руб.

Стоимость ценностей, уничтоженных в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО при пожарах за год $C_{у.цi}$, может быть рассчитана по формуле:

$$C_{у.цi} = C_{у.м.цi} + C_{п.лi} + C_{тр.лi}, \quad (3)$$

где $C_{тр.лi}$ — денежный эквивалент стоимости выплат людям, получившим травмы в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО при пожарах за год, руб.

При проведении расчетов затраты государства на компенсацию родным и близким погибших при пожарах людей (денежный эквивалент стоимости всех погибших при пожаре людей) в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО за год $C_{пл}$ могут быть рассчитаны по формуле:

$$C_{пл\ i} = M_{пл\ i} \mathcal{E}, \quad (4)$$

где $M_{пл\ i}$ — число людей, погибших при пожарах в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО за год; \mathcal{E} — среднестатистический денежный эквивалент стоимости человеческой жизни (может быть принят равным 3,8 млн руб/чел. [16, 17]).

Денежный эквивалент стоимости спасенных в зданиях i -го класса ФПО при пожарах людей за год может быть рассчитан по формуле:

$$C_{сл\ i} = M_{сл\ i} \mathcal{E}, \quad (5)$$

где $M_{сл\ i}$ — число людей, спасенных в зданиях i -го класса ФПО при пожарах за год.

Денежный эквивалент стоимости эвакуированных из зданий (сооружений) i -го класса ФПО при пожарах людей за год может быть рассчитан по формуле:

$$C_{эл\ i} = M_{эл\ i} \mathcal{E}, \quad (6)$$

где $M_{эл\ i}$ — число людей, эвакуированных из зданий (сооружений) i -го класса ФПО при пожарах за год.

Денежный эквивалент стоимости травмированных при пожарах людей в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО за год может быть рассчитан по формуле:

$$C_{тр\ i} = M_{тр\ i} \mathcal{Z}, \quad (7)$$

где $M_{тр\ i}$ — число людей, травмированных при пожарах в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО за год; \mathcal{Z} — среднестатистический размер выплат людям, получившим травму при пожарах в зданиях (сооружениях) i -го класса ФПО за год (может быть принят равным 2 млн руб/чел. [18, 19]).

Обсуждение результатов

Обработка статистической информации о пожарах и их последствиях в зданиях (сооружениях) различного класса ФПО, зафиксированного в карточке учета пожара (КУП), за 10 мес 2019 г. позволила рассчитать уровень противопожарной защиты зданий i -го класса ФПО. Результаты этих расчетов приведены в табл. 1 (расшифровка классов ФПО, в соответствии со ст. 32 [8], представлена далее).

В соответствии с положениями законопроекта [3] для объектов контроля, отнесенных к категории: чрезвычайно высокого риска причинения вреда (ущерба), устанавливается максимальная частота

Таблица 1

Класс ФПО здания	$C_{ум.п\ i}$ млн руб.	$C_{см.п\ i}$ млн руб.	$C_{пл\ i}$ млн руб.	$C_{сл\ i}$ млн руб.	$C_{эл\ i}$ млн руб.	$C_{тр\ i}$ млн руб.	n_i	$(n_i/n) \cdot 10^{-4}$	$U_i \cdot 10^{-4}$
Ф1.1	20,73	223,33	7,6	2910,8	26592,4	22	235	5,7	5,7
Ф1.2	30,51	604,68	64,6	1409,8	24449,2	92	350	8,4	8,4
Ф1.3	839,49	10682,79	7949,6	84804,6	248166,6	5802	29 281	706,7	677,5
Ф1.4	2078,36	10609,79	13338,0	18357,8	13148,0	3894	38 492	929,1	617,2
Ф2.1	42,34	39,83	0	30,4	6486,6	0	123	3,0	2,9
Ф2.2	7,54	8,00	0	380,0	805,6	2	26	0,6	0,6
Ф2.3	0,44	10,02	0	0	1166,6	0	33	0,8	0,8
Ф2.4	0,83	1,31	0	3,8	0	2	20	0,5	0,3
Ф3.1	951,24	9269,07	11,4	2926,0	77060,2	78	2340	56,5	55,8
Ф3.2	155,78	580,01	19,0	1459,2	11400,0	70	588	14,2	13,9
Ф3.3	0,16	4,55	0	11,4	250,8	2	26	0,6	0,6
Ф3.4	14,08	89,78	7,6	224,2	6509,4	4	110	2,7	2,6
Ф3.5	16,97	120,28	0	258,4	4590,4	22	254	6,1	6,1
Ф3.6	118,91	680,23	41,8	266,0	9458,2	66	2043	49,3	48,3
Ф3.7	8,32	215,82	0	0	34,2	22	60	1,4	1,3
Ф4.1	42,38	210,46	7,6	95,0	52622,4	0	190	4,6	4,6
Ф4.2	2,38	9,60	0	269,8	32683,8	0	58	1,4	1,4
Ф4.3	79,05	526,04	15,2	399,0	17632,0	30	772	18,6	18,5
Ф4.4	2,27	0	0	0	49,4	0	4	0,1	0,1
Ф5.1	749,37	3606,68	167,2	1531,4	9583,6	192	2978	71,9	66,8
Ф5.2	2226,05	1994,56	357,2	1782,2	4978,0	272	7171	173,1	129,5
Ф5.3	226,33	744,90	148,2	551,0	710,6	86	1978	47,7	38,5
Не указан в КУП	506,03	707,86	1185,6	5312,4	4275,0	678	29 441	710,6	570,1
Не предусмотрен класс ФПО	2629,30	2988,37	1162,8	3674,6	17825,8	3448	297 739	7186,3	5346,6

проведения плановых контрольно-надзорных мероприятий — не менее одного, но не более двух контрольно-надзорных мероприятий в год;

высокого или значительного риска, устанавливается средняя частота проведения плановых контрольно-надзорных мероприятий — не менее одного контрольно-надзорного мероприятия в четыре года и не более одного контрольно-надзорного мероприятия в два года;

среднего и умеренного риска, устанавливается минимальная частота проведения плановых контрольно-надзорных мероприятий — не менее одного контрольно-надзорного мероприятия в шесть лет и не более одного контрольно-надзорного мероприятия в три года;

низкого риска, плановые контрольно-надзорные мероприятия не проводятся.

В табл. 2 приведено распределение совокупности зданий и сооружений каждого класса ФПО в зависимости от возрастания уровня противопожарной защиты, рассчитанного по приведенной выше методике. Предложены рекомендуемые категории риска причинения вреда (ущерба) и целесообразная периодичность проведения плановых проверок зданий (сооружений), входящих в соответствующую категорию риска, определенная с учетом положений работы [20].

Таким образом, в зависимости от уровня противопожарной защиты зданий, сооружений, приведенного в табл. 2 (критерий тяжести потенциальных

негативных последствий возможного несоблюдения на объекте защиты обязательных требований):

к категории чрезвычайно высокого риска причинения вреда (ущерба) относятся следующие объекты защиты:

театры, кинотеатры, концертные залы, клубы, цирки, спортивные сооружения с трибунами, библиотеки и другие учреждения с расчетным числом посадочных мест для посетителей в закрытых помещениях (Ф2.1);

музеи, выставки, танцевальные залы и другие подобные учреждения в закрытых помещениях (Ф2.2);

театры, кинотеатры, концертные залы, клубы, цирки, спортивные сооружения с трибунами, библиотеки и другие учреждения с расчетным числом посадочных мест для посетителей на открытом воздухе (Ф2.3);

музеи, выставки, танцевальные залы и другие подобные учреждения на открытом воздухе (Ф2.4);

вокзалы (Ф3.3);

поликлиники и амбулатории (Ф3.4);

объекты религиозного назначения (Ф3.7);

здания общеобразовательных организаций, организаций дополнительного образования детей, профессиональных образовательных организаций (Ф4.1);

здания образовательных организаций высшего образования, организаций дополнительного профессионального образования (Ф4.2);

Таблица 2

№ п/п	$Y_i \cdot 10^{-4}$	Класс ФПО зданий (сооружений)	Интервал изменения уровня противопожарной защиты зданий (сооружений), $\delta \cdot 10^{-4}$	Категория риска причинения вреда (ущерба)	Периодичность проведения плановых проверок
1	0,1	Ф4.4	$0 \leq \delta \leq 5$	Чрезвычайно высокий	Один (два) раза в год
2	0,3	Ф2.4			
3	0,6	Ф2.2, Ф3.3			
4	0,8	Ф2.3			
5	1,3	Ф3.7			
6	1,4	Ф4.2			
7	2,6	Ф3.4			
8	2,9	Ф2.1			
9	4,6	Ф4.1			
10	5,7	Ф1.1	$5 < \delta \leq 10$	Высокий	Один раз в два года
11	6,1	Ф3.5			
12	8,4	Ф1.2			
13	13,9	Ф3.2	$10 < \delta \leq 20$	Значительный	Один раз в два (три) года
14	18,5	Ф4.3			
15	38,5	Ф5.3	$20 < \delta \leq 50$	Средний	Один раз в три (четыре) года
16	48,3	Ф3.6			
17	55,8	Ф3.1	$50 < \delta \leq 100$	Умеренный	Один раз в четыре (пять) лет
18	66,8	Ф5.1			
19	129,5	Ф5.2			
20	570,1	Не указан в КУП	$\delta \geq 100$	Низкий	Проверки не проводятся
21	617,2	Ф1.4			
22	677,5	Ф1.3			
23	5346,6	Не предусмотрен			

многоквартирные жилые дома высотой более 75 м (Ф1.3);

здания пожарных депо (Ф4.4);

к категории высокого риска причинения вреда (ущерба) относятся следующие объекты защиты:

здания дошкольных образовательных организаций, специализированных домов престарелых и инвалидов (не квартирные), больницы, спальные корпуса образовательных организаций с наличием интерната и детских организаций (Ф1.1);

гостиницы, общежития, спальные корпуса санаториев и домов отдыха общего типа, кемпингов, мотелей и пансионатов (Ф1.2);

помещения для посетителей организаций бытового и коммунального обслуживания с нерасчетным числом посадочных мест для посетителей (Ф3.5);

к категории значительного риска причинения вреда (ущерба) относятся следующие объекты защиты:

здания организаций общественного питания (Ф3.2);

здания органов управления учреждений, проектно-конструкторских организаций, информационных и редакционно-издательских организаций, научных организаций, банков, контор, офисов (Ф4.3);

к категории среднего риска причинения вреда (ущерба) относятся следующие объекты защиты:

физкультурно-оздоровительные комплексы и спортивно-тренировочные учреждения с помещениями без трибун для зрителей, бытовые помещения, бани (Ф3.6);

здания сельскохозяйственного назначения (Ф5.3);

к категории умеренного риска причинения вреда (ущерба) относятся следующие объекты защиты:

многоквартирные жилые дома высотой от 28 до 75 м (Ф1.3);

здания организаций торговли (Ф3.1);

производственные здания, сооружения, производственные и лабораторные помещения, мастерские (Ф5.1);

к категории низкого риска причинения вреда (ущерба) относятся следующие объекты защиты:

многоквартирные жилые дома высотой не более 28 м (Ф1.3);

одноквартирные жилые дома, в том числе блокированные (Ф1.4);

складские здания, сооружения, стоянки для автомобилей без технического обслуживания и ремонта, книгохранилища, архивы, складские помещения (Ф5.2);

иные объекты защиты, не отнесенные к категориям чрезвычайно высокого, высокого, значительного, среднего и умеренного рисков.

Анализ приведенной выше классификации и информации из табл. 2 показывает, что она в целом правильно отражает взаимосвязь ФПО зданий (сооружений) с необходимой периодичностью

проведения плановых проверок для поддержания приемлемого уровня их противопожарной защиты.

Сопоставление распределения (группировки) зданий и сооружений (объектов защиты) различного класса ФПО по категориям риска причинения вреда (ущерба), приведенного выше и регламентированного [2], свидетельствует об их существенном различии. Это объясняется, с одной стороны, тем, что классификация зданий (сооружений) по ФПО, приведенная в [8], не имеет той детализации, которая необходима для эффективной практической работы органов ГПН МЧС России по составлению и реализации оптимального плана проведения плановых проверок объектов защиты. С другой стороны, инструкция по заполнению КУП [21] позволяет дифференцировать пожары в зданиях (сооружениях) в зависимости от их функционального назначения и класса ФПО, но не содержит классификации, приведенной в [2]. Поэтому для проверки объективности классификации, представленной в [2], необходимо внести изменения в КУП и порядок заполнения и представления КУП [21] и после сбора статистической информации за определенный период времени повторно провести расчет уровня противопожарной защиты зданий (сооружений).

В то же время законопроект [3] позволяет за счет маневрирования допустимой периодичностью проведения плановых проверок и сложившейся дифференциации объектов защиты по категориям риска [2] вручную согласовать между собой две имеющиеся классификации без внесения деструктивной составляющей в деятельность органов ГПН МЧС России. Например, расчет уровня противопожарной защиты всей совокупности многоквартирных домов без их деления на группы по этажности показывает, что $Y_i = 677,5 \cdot 10^{-4}$, поэтому многоквартирные жилые дома отнесены к категории низкого риска.

Однако если провести оценку уровня противопожарной защиты отдельно многоквартирных домов высотой, равной или менее 28 м, домов высотой более 28 м, но менее 75 м и домов высотой более 75 м, то для первой группы домов получим $Y_i = 538,6 \cdot 10^{-4}$, для второй — $Y_i = 98,6 \cdot 10^{-4}$, а для третьей — $Y_i = 0,8 \cdot 10^{-4}$. Поэтому многоквартирные жилые дома высотой, равной или менее 28 м, следует отнести к категории низкого риска, дома высотой более 28 м, но менее 75 м — к категории умеренного риска, а многоквартирные жилые дома высотой более 75 м — к категории чрезвычайно высокого риска. Приведенный пример наглядно показывает, что распределение зданий (сооружений) по категориям риска существенно зависит от степени детализации их характеристик (наименование, этажность, площадь и др.). К сожалению, провести такую дифференциацию по всем объектам защиты, приведенным в [2], не представляется возможным, так как такая классификация не предусмотрена приказом МЧС России [21], поэтому статистическая информация о

пожарах и их последствиях на этих объектах защиты в базе «Статистика пожаров» отсутствует.

Заключение

Впервые разработан объективный критерий отнесения объектов защиты к категориям риска причинения вреда (ущерба), который учитывает тяжесть и вероятность причинения вреда (ущерба) охраняемым законом ценностям в результате возникновения пожара.

При определении критерия риска причинения вреда (ущерба) вероятность (частота) возникновения пожара и размер вреда (ущерба) в результате пожара рассчитываются исходя из предшествующих статистических данных о фактическом причинении вреда (ущерба) в результате имевших место пожаров по различным видам объектов защиты.

Предложенная методология распределения объектов защиты по категориям риска причинения вреда (ущерба) объектам защиты в результате пожара в зависимости от уровня их противопожарной защиты впервые позволяет наиболее объективно спланировать периодичность проведения плановых проверок этих объектов защиты для поддержания их противопожарной защиты на приемлемом для государства уровне.

Для эффективного использования предложенной методологии необходимо внесение изменений в документы, регламентирующие порядок сбора, учета и обработки статистической информации о пожарах и их последствиях на объектах контроля органов федерального государственного пожарного надзора МЧС России.

Список литературы

1. *О защите прав юридических лиц и индивидуальных предпринимателей при осуществлении государственного контроля (надзора) и муниципального контроля*: федер. закон Рос. Федерации от 26 дек. 2008 г. № 294-ФЗ. URL: <https://rg.ru/2008/12/30/prava-kontrol-dok.html> (дата обращения: 30.01.2020).
2. *О федеральном государственном пожарном надзоре*: постановление Правительства Рос. Федерации от 12 апр. 2012 г. № 290. URL: <https://rg.ru/2012/04/24/gospozhnadzor-dok.html> (дата обращения: 30.01.2020).
3. *О государственном контроле (надзоре) и муниципальном контроле в Российской Федерации*: проект федер. закона Рос. Федерации от 3 дек. 2019 г. № 850621-7. URL: <http://docs.cntd.ru/document/554562291> (дата обращения: 30.01.2020).
4. *Hampton P. Reducing administrative burdens: effective inspection and enforcement*. URL: http://news.bbc.co.uk/1/hi/shared/bsp/hi/pdfs/bud05hampton_150305_640.pdf (дата обращения: 30.01.2020).
5. *Black J. Risk-based regulation: choices, practices and lessons being learnt*// Risk and regulatory policy. Improving the governance of risk. — Paris: OECD Publishing, 2010. — P. 185–237.
6. *GCH*. URL: <https://gcn.com/Articles/2013/08/01/FDNY-data-analytics.aspx?> (дата обращения: 30.01.2020).

7. *Контрольно-надзорная деятельность в Российской Федерации*: Аналитический доклад — 2013. — М.: МАКС Пресс, 2014. — 272 с.

8. *Технический регламент о требованиях пожарной безопасности*: федер. закон Рос. Федерации от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ (с изменениями на 27 дек. 2018 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 30.01.2020).

9. *Реформирование проверок соответствия правилам безопасности: международный опыт внедрения риск-ориентированного подхода*. URL: https://bstudy.net/628848/ekonomika/reformirovanie_proverok_sootvetstviya_pravilam_bezopasnosti_mezhdunarodnyy_opyt_vnedreniya_risk_orienti#807 (дата обращения: 30.01.2020).

10. *ГОСТ Р ИСО/МЭК 31010—2011*. Менеджмент риска. Методы оценки риска (ISO/IEC 31010:2009. Risk management — Risk assessment techniques (IDT). URL: https://ivan-shamaev.ru/wp-content/uploads/2013/05/31010-2011_Russia.pdf (дата обращения: 30.01.2020).

11. *Солодов А.К.* Основы финансового риск-менеджмента: учеб. и учеб. пособие. — М.: Издание Александра К. Солодова, 2018. — 286 с.

12. *Лесных В.В., Литвин Ю.В.* Методика интегральной оценки рисков событий по качественно и количественно заданным факторам. URL: https://www.muiv.ru/vestnik/pdf/eu/eu_2012_1_122_135.pdf (дата обращения: 30.01.2020).

13. *Saaty T. Mathematical Principles of Decision Making (Principia Mathematica Decernendi)*. — Pittsburgh: RWS Publications, 2010.

14. *Определение уровня риска и его размерность*. URL: <https://cyberpedia.su/14x132d2.html> (дата обращения: 31.01.2020).

15. *Минаев С.Н., Гаврилей В.М.* Оценка уровня пожарной защиты объектов народного хозяйства// Вопросы экономики в пожарной охране: сб. ст. Вып. 3. — М.: ВНИИПО МВД СССР, 1974. — С. 58–67.

16. *Харисов Г.Х.* Экономический эквивалент человеческой жизни. — М.: Академия ГПС МЧС России, 2016. — 64 с.

17. *Быков А.А.* О методологии экономической оценки жизни среднестатистического человека (пояснительная записка)// Проблемы анализа риска. — 2007. — Т. 4. — № 2. — С. 178–191.

18. *Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте*: федер. закон Рос. Федерации от 27 июля 2010 г. № 225-ФЗ. URL: <https://rg.ru/2010/08/02/osgo-dok.html> (дата обращения: 31.01.2020).

19. *Правила осуществления Национальным союзом страховщиков ответственности компенсационных выплат потерпевшим и распределения ответственности по обязательствам Национального союза страховщиков ответственности, связанным с осуществлением компенсационных выплат, между его членами: правила профессиональной деятельности страховщиков*. URL: https://nss.ru/affected/opro/docs_for_pay/ppd_cv.pdf (дата обращения: 31.01.2020).

20. *Методика обоснования оптимальной периодичности проведения плановых проверок противопожарного состояния объектов защиты органами ГПН МЧС России*/ А.В. Ма-

тюшин, А.А. Кондашов, Ю.А. Матюшин, В.И. Сибирко// Пожарная безопасность. — 2019. — № 2. — С. 72–80.

21. *О формировании* электронных баз данных учета пожаров и их последствий: приказ МЧС России от 24 дек. 2018 г. № 625. URL: <http://docs.cntd.ru/document/5и52366056> (дата обращения: 30.01.2020).

gnsmatyushin@mail.ru

Материал поступил в редакцию 12 февраля 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 64–72.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-64-72

Methodology for the Distribution of Objects of Protection by Categories of Risk Causing Harm (Damage) to the Objects of Protection in Case of Fire

A.V. Matyushin, Dr. Sci. (Eng.), Chief Research Associate, gnsmatyushin@mail.ru

A.G. Firsov, Cand. Sci. (Eng.), Deputy Head of the Department

Yu.A. Matyushin, Cand. Sci. (Eng.), Department Head

V.S. Goncharenko, Research Associate

FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, Balashikha, Russia

Abstract

Regulatory legal acts of the Russian Federation established that the control and supervisory body, when exercising state control (supervision), municipal control, assigns the objects of control to one of six categories of risk of causing harm. In this case, the criteria for assigning the objects of control to the categories of risk of causing harm should be formed based on the results of assessment of risk causing harm.

In Russia, the distribution of buildings and structures of a different class of functional fire hazard by risk category has so far been carried out based on practical experience of the activity of the state fire control bodies of EMERCOM of Russia.

The paper analyzes the reasons that do not allow the use of classical methods.

The aim of the work is to justify the frequency of scheduled inspections of the objects of control by the state fire supervision authorities. For this, the criterion is formulated for assigning the objects of protection to that or that category of risk causing harm. As a criterion for assigning the object of control to the categories of risk causing harm it is proposed to use the level of fire protection of buildings (structures) of different class of functional fire hazard. Mathematical model is developed for defining the level of buildings fire protection, and the assessment of its values for buildings (structures) of a different class of functional fire hazard is given.

The distribution of objects of control (objects of protection) is made by categories of risk causing harm (damage) depending on the calculated value of their fire protection level. It is shown that the distribution of the objects of control by risk categories significantly depends on their level of details in the fire record card of the characteristics of the building in which the fire occurred. Optimal terms are proposed for conducting scheduled inspections of the objects of control depending on the risk category to which they are assigned. Suggestions are formulated concerning the

improvement of risk-oriented approach in the activity of the state fire supervision authorities of EMERCOM of Russia.

Key words: control and supervision body, risk causing harm, risk category, damage, state supervision authorities, objects of control, criterion, probability of causing harm, level of fire protection, class of functional fire hazard.

References

1. On the protection of the rights of legal entities and individual entrepreneurs at the implementation of state control (supervision) and municipal control: Federal law of the Russian Federation of December 26, 2008 № 294-FZ. Available at: <https://rg.ru/2008/12/30/prava-kontrol-dok.html> (accessed: January 30, 2020). (In Russ.).

2. On the federal state fire supervision: Decree of the Government of the Russian Federation of April 12, 2012 № 290. Available at: <https://rg.ru/2012/04/24/gospozhнадзор-dok.html> (accessed: January 30, 2020). (In Russ.).

3. On the state control (supervision) and municipal control in the Russian Federation: draft of the Federal Law of the Russian Federation dated December 3, 2019 № 850621-7. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/554562291> (accessed: January 30, 2020). (In Russ.).

4. Hampton P. Reducing administrative burdens: effective inspection and enforcement. Available at: http://news.bbc.co.uk/1/1/shared/bsp/hi/pdfs/bud05hampton_150305_640.pdf (accessed: January 30, 2020).

5. Black J. Risk-based regulation: choices, practices and lessons being learnt. Risk and regulatory policy. Improving the governance of risk. Paris: OECD Publishing, 2010. pp. 185–237.

6. GCH. Available at: <https://gcn.com/Articles/2013/08/01/FDNY-data-analytics.aspx?> (accessed: January 30, 2020).

7. Control and supervision activity in the Russian Federation: Analytical report — 2013. Moscow: MAKS Press, 2014. 272 p. (In Russ.).

8. Technical regulation on fire safety requirements: Federal Law of the Russian Federation of July 22, 2008 № 123-FZ (as amended on December 27, 2018). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (accessed: January 30, 2020). (In Russ.).

9. Reform of inspection of the conformity with safety rules: international experience in risk-oriented approach implementation. Available at: https://bstudy.net/628848/ekonomika/reformirovanie_proverok_sootvetstviya_pravilam_bezopasnosti_mezhdunarodnyy_opyt_vnedreniya_risk_orientirovannykh (accessed: January 30, 2020). (In Russ.).

10. GOST R ISO/ IEC 31010—2011. Risk management. Risk assessment methods (ISO/ IEC 31010: 2009. Risk management — Risk assessment techniques (IDT). Available at: https://ivan-shamaev.ru/wp-content/uploads/2013/05/31010-2011_Russia.pdf (accessed: January 30, 2020). (In Russ.).

11. Solodov A.K. Fundamentals of financial risk management: textbook and manual. Moscow: Izdanie Aleksandra K. Solodova, 2018. 286 p. (In Russ.).

12. Lesnykh V.V., Litvin Yu.V. Methodology of the integrated assessment of risk events by qualitatively and quantitatively specified factors. Available at: https://www.muiv.ru/vestnik/pdf/eu/eu_2012_1_122_135.pdf (accessed: January 30, 2020). (In Russ.).

13. Saaty T. Mathematical Principles of Decision Making (Principia Mathematica Decernendi). Pittsburgh: RWS Publications, 2010.

14. Determination of risk level and its dimension. Available at: <https://cyberpedia.su/14x132d2.html> (accessed: January 31, 2020). (In Russ.).

15. Minaev S.N., Gavriley V.M Assessment of fire protection level of the objects of national economy. *Voprosy ekonomiki v pozharной okhrane: sb. st.* (Economic Issues in Fire Protection: digest of articles). Iss. 3. Moscow: VNIPO MVD SSSR, 1974. pp. 58–67. (In Russ.).

16. Kharisov G.Kh. Economic equivalent of human life. Moscow: Akademiya. GPS MChS Rossii, 2016. 64 p. (In Russ.).

17. Bykov A.A. On the methodology of economic assessment of the life of statistically average person (explanatory note). *Problemy analiza riska = Issues of Risk Analysis*. 2007. Vol. 4. № 2. pp. 178–191. (In Russ.).

18. On the obligatory insurance of civil liability of the owner of a hazardous object for causing harm as a result of an accident at a hazardous object: Federal Law of the Russian Federation of

July 27, 2010 № 225-FZ. Available at: <https://rg.ru/2010/08/02/osgo-dok.html> (accessed: January 31, 2020). (In Russ.).

19. Rules for the implementation of compensation payments to the victims by the National Association of Liability Insurers, and the distribution of responsibility for the obligations of the National Association of Liability Insurers related to the implementation of compensation payments among its members: rules of insurers professional activity. Available at: https://nssso.ru/affected/opo/docs_for_pay/ppd_cv.pdf (accessed: January 31, 2020). (In Russ.).

20. Matyushin A.V., Kondashov A.A., Matyushin Yu.A., Sibirko V.I. Methodology for substantiating the optimal frequency of conducting scheduled inspections of fire-prevention state of the objects of protection by GosPozhNadzor of EMERCOM of Russia. *Pozharnaya bezopasnost = Fire Safety*. 2019. № 2. pp. 72–80. (In Russ.).

21. On the formation of electronic data bases for recording fires and their consequences: Order of EMERCOM of Russia dated December 24, 2018 № 625. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/5i52366056> (accessed: January 30, 2020). (In Russ.).

Received February 12, 2020



ГОЛИК Владимир Иванович (к 80-летию со дня рождения)

1 мая 2020 г. исполнилось 80 лет Владимиру Ивановичу Голику, доктору технических наук, профессору Южно-Российского государственного политехнического университета им. М.И. Платова и Северо-Кавказского государственного технологического университета, главному научному сотруднику Центра геофизических исследований Владикавказского научного центра РАН и Правительства Республики Северная Осетия — Алания.

Родился В.И. Голик в станице Васюринская Динского р-на Краснодарского края. После окончания в 1962 г. Северо-Кавказского горно-металлургического института по специальности «разработка месторождений полезных ископаемых» трудился в Садонском свинцово-цинковом комбинате, где прошел путь от горного мастера до заместителя главного инженера рудника. В 1966–1990 гг.

работал на горных предприятиях Первого главного управления Министерства среднего машиностроения СССР: Целинном и Приаргунском горно-химических комбинатах, участвовал в разработке урановых месторождений Северного Казахстана. Без отрыва от производства защитил кандидатскую и докторскую диссертации.

Основные направления научной деятельности юбиляра: управление состоянием рудовмещающих массивов при добыче руд; добыча металлов подземным, кучным и скважинным выщелачиванием; утилизация отходов горной добычи и переработки с повышением качества компонентов; проходка горных выработок скоростными темпами; природоохранная техника и технология; экономика пользования недрами. Он автор около 1000 научных трудов, в том числе 70 монографий, учебников и учебных пособий, 35 патентов и свидетельств на изобретения; 4 поэтических сборников и книг. Владимир Иванович — действительный член Российских академий горных и естественных наук, Международной академии наук экологии и безопасности жизнедеятельности, член ряда диссертационных советов, выпустил 40 докторов и кандидатов наук.

Владимир Иванович Заслуженный деятель науки Российской Федерации, почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, почетный член Союза горняков и металлургов Саксонии, член редколлегий ряда изданий, в том числе журнала «Безопасность труда в промышленности», полный кавалер знака «Горняцкая слава», награжден медалями «В ознаменование 100-летия со дня рождения В.И. Ленина» и им. В.А. Легасова, орденом «Звезда ученого».

Редакционный совет, редколлегия и редакция журнала «Безопасность труда в промышленности» сердечно поздравляют Владимира Ивановича с 80-летием, желают крепкого здоровья, благополучия, долгих лет жизни и творческих успехов.



И.А. Тарарычкин,
д-р техн. наук, проф.,
donbass_8888@mail.ru

Луганский национальный
университет им. Владимира Даля,
Луганск, Украина

Стойкость трубопроводных систем к повреждениям в условиях ремонта и реконструкции

Изменение структурного состава трубопроводных систем при ремонте и реконструкции может стать причиной их уязвимости в случае возникновения аварий. Ремонтные работы следует планировать с учетом негативного влияния структурных изменений на поведение систем при развитии нештатных ситуаций. Предложен метод оценки стойкости к повреждениям и показаны его возможности на примерах оценки свойств трубопроводных систем при плановом ремонте производственных линий, участков, а также в условиях реконструкции.

Ключевые слова: трубопровод, система, структура, повреждение, сеть, авария, стойкость, метод имитационного моделирования.

Для цитирования: Тарарычкин И.А. Стойкость трубопроводных систем к повреждениям в условиях ремонта и реконструкции // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 73–78. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-73-78

Введение

Трубопроводные транспортные системы (ТТС) используют при доставке потребителям сырья, материалов, готовой продукции. Их применение обеспечивает протекание непрерывных технологических процессов в машиностроении, металлургии, химических производствах. Трубопроводные транспортные системы как объекты критической инфраструктуры позволяют доставлять потребителям целевой продукт в заданных объемах, обеспечивая требуемые режимы функционирования технологического оборудования [1–6].

В случае возникновения ситуаций, не предусмотренных условиями номинальной эксплуатации, в состояние неработоспособности может перейти некоторая совокупность структурных элементов ТТС, что влечет отключение от источника сначала части, а затем и всех потребителей целевого продукта [7, 8].

Если происходит случайный переход в состояние неработоспособности совокупности трубопроводов, то такая схема воздействия на анализируемую ТТС называется прогрессирующим повреждением. Если же в состояние неработоспособности в случайном порядке переходит некоторое число транспортных узлов, то такой характер повреждения называется прогрессирующей блокировкой. Наиболее сложный сценарий развития аварии — смешанное повреждение, при котором случайным образом повреждаются как линейные, так и точечные структурные элементы.

Стойкость ТТС характеризует ее способность противостоять развитию процесса смешанного повреждения. Однако на практике возможно возникновение ситуации, при которой система, обладающая в целом достаточно высокой стойкостью, функциони-

рует в условиях реконструкции или ремонта отдельных частей. Наблюдаемые структурные изменения, связанные с временным отключением ремонтируемых технологических фрагментов, могут отрицательно повлиять на поведение системы в аварийных условиях — она может оказаться весьма уязвимой к нештатным ситуациям, что следует учитывать при планировании и проведении ремонтных работ.

Оценка стойкости ТТС в условиях ремонтных операций представляет практический интерес, однако в технической литературе системные данные по этому вопросу отсутствуют.

Цель работы — оценка стойкости к смешанному повреждению ТТС, функционирующих в условиях реконструкции или ремонта отдельных технологических фрагментов.

Для характеристики процесса смешанного повреждения необходимо использовать циклограмму $T(\alpha, \beta)$, где α — число повреждаемых случайным образом линейных элементов в течение одного цикла воздействия на систему; β — число блокируемых транспортных узлов в течение одного цикла воздействия на систему.

Заданная циклограмма $T(\alpha, \beta)$ позволяет установить для каждого момента системного времени количественный состав работоспособных элементов и таким образом алгоритмизировать процедуру случайного повреждения сетевой структуры.

Имитационное моделирование процесса смешанного повреждения выполнялось для циклограммы типа $T(1,1)$, т.е. для условий поочередного случайного повреждения одного линейного и одного точечного элементов системы до момента полного разрыва связи всех потребителей с источником [9–11].

Исходная сетевая структура системы задается при помощи матрицы смежности, которая в условиях смешанного повреждения трансформируется следующим образом. Если в некоторый момент системного времени воздействие на систему связано со случайным повреждением трубопровода, то в бинарной матрице смежности обнуляется случайно выбранный ненулевой элемент. Если воздействие на систему связано со случайной блокировкой i -го транспортного узла, то в соответствующей матрице смежности проводится обнуление всех элементов, расположенных в i -й строке и i -м столбце.

Для каждого момента системного времени устанавливаются соответствующие матрицы достижимости, позволяющие оценивать наличие связи каждого из потребителей целевого продукта с источником. Вычислительный цикл завершается после того, как в ТТС происходит отключение от узла — источника для всех потребителей целевого продукта.

По результатам многократного повторения указанной вычислительной процедуры определялись следующие статистические характеристики процесса смешанного повреждения.

1. Средняя доля линейных элементов L в ТТС, повреждение которых приводит к разрыву связей источника со всеми потребителями, — φ_l .

2. Средняя доля узлов U , при блокировке которых в условиях смешанного повреждения происходит разрыв связи источника со всеми потребителями, — φ_u .

Значения $\varphi_l \leq 1$ и $\varphi_u \leq 1$ рассматриваются как проекции на координатные оси вектора $\vec{\Phi}^*$, характеризующего способность анализируемой системы противостоять развитию смешанного повреждения. При этом большим значениям модуля $|\vec{\Phi}^*|$ соответствует и большая способность системы противостоять развитию повреждения. Значения $|\vec{\Phi}^*| = \sqrt{\varphi_l^2 + \varphi_u^2}$ устанавливались для условий многократного воспроизведения процедуры повреждения сетевой структуры с объемом выборки $1 \cdot 10^4$ элементов. Вычисления в системе Mathcad позволили определить значения φ_l и φ_u с двумя значащими цифрами после запятой [12, 13].

Метод имитационного моделирования процесса смешанного повреждения имеет следующие особенности и ограничения.

1. Наличие связи отдельного потребителя с источником продукта устанавливается по факту, т.е. без учета конкретных объемов доставки.

2. Свойства ТТС, связанные со способностью системы противостоять развитию смешанного повреждения, устанавливаются по результатам большого числа испытаний. При этом имитация каждого испытания завершается оценкой наблюдаемых последствий — разрыва трубы у нагнетательного насоса, внезапного отключения источника

от системы, отрыва фланца в результате усталости металла и т.п.

3. Сравнение характеристик стойкости к смешанному повреждению различных сетевых структур возможно только при условии их сопоставимости. Для этого анализируемые ТТС должны иметь в своем составе одинаковое число линейных элементов L , транспортных узлов U , потребителей P целевого продукта I . Кроме того, процедура смешанного повреждения каждой структуры проходит с одинаковыми заданными параметрами циклограммы α и β . Если рассматриваемые системы не удовлетворяют вышеперечисленным условиям, то корректное сравнение их свойств не представляется возможным.

В течение всего периода эксплуатации техническое состояние ТТС контролируют и выполняют необходимый ремонт [14–17]. Целесообразно организовать ремонтные работы так, чтобы временное исключение отдельных фрагментов из общей системы не оказывало отрицательного влияния на эксплуатационные свойства и возможности ТТС. Если система оказывается в состоянии низкой стойкости, то даже незначительные повреждения могут привести к частичной или полной потере работоспособности. Поэтому ремонтные и другие операции, связанные со структурными вариациями ТТС, следует планировать с учетом рассчитанных изменений их стойкости к смешанному повреждению.

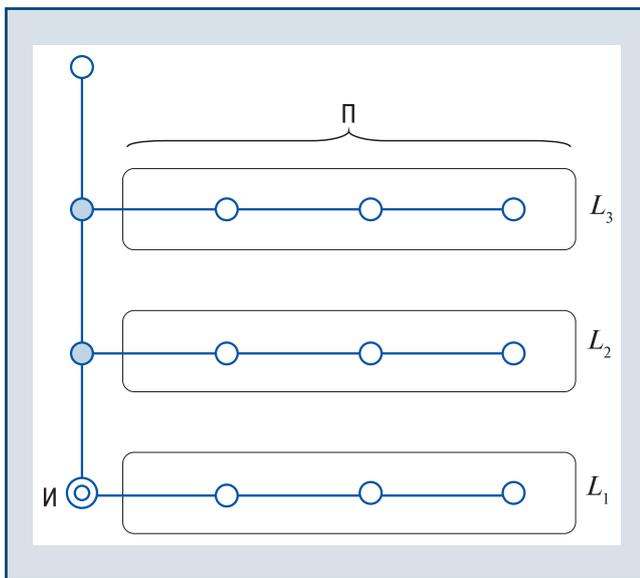
Стойкость к повреждениям трубопроводных систем при ремонте отдельных производственных линий

Оценим стойкость ТТС к смешанному повреждению для различных вариантов отключения производственных линий транспортно-технологического комплекса предприятия в ходе их ремонта и техобслуживания — путем поочередного отключения линий от действующей ТТС и вывода их из эксплуатации. Выявим, при каких ремонтных операциях сетевая структура оказывается в наиболее уязвимом состоянии.

После завершения ремонта или техобслуживания линия вновь подключается к ТТС и переводится в режим номинального функционирования. Затем отключается следующая линия и т.д. Указанная процедура несинхронного отключения линий позволяет поддерживать техническую готовность транспортно-технологического комплекса и выполнять все необходимые работы без остановки производства.

Рассмотрим ТТС, три производственные линии которой планируется поочередно выводить из эксплуатации для замены технологического оборудования (рис. 1, здесь P — потребитель; I — источник продукта; L_1, L_2, L_3 — производственные линии).

На рис. 2 представлены различные варианты структурной схемы ТТС с поочередным отключе-



▲ Рис. 1. Структурная схема трубопроводной системы, обслуживающей технологическое оборудование трех производственных линий L_1 , L_2 , L_3

▲ Fig. 1. Structural diagram of the pipeline system servicing process equipment of three production lines L_1 , L_2 , L_3

нием производственных линий при выполнении ремонтных работ: SSL_1 — без первой линии; SSL_2 — без второй; SSL_3 — без третьей.

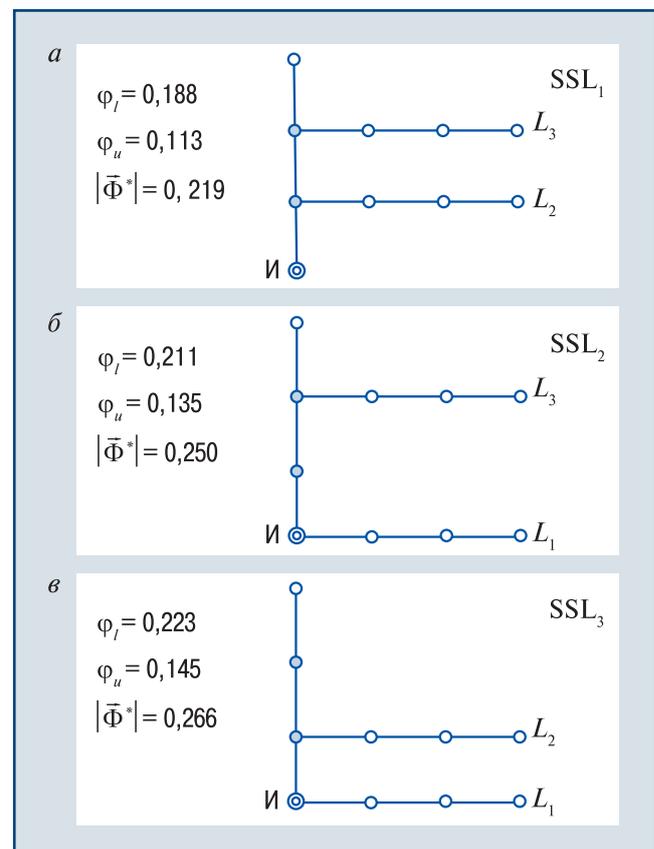
Видно, что каждый вариант отключения связан с выводом из состава ТТС трех трубопроводов и трех потребителей целевого продукта. По этой причине у оставшейся части системы число структурных элементов (узлов, линий, потребителей) остается неизменным при любом варианте отключения ($U = 10$, $L = 9$, $\Pi = 7$).

Если сетевые структуры SSL_1 , SSL_2 , SSL_3 (см. рис. 2) подвергаются смешанному повреждению с циклограммой $T(1,1)$, то соответствующие характеристики стойкости можно корректно сравнить между собой. На рис. 2 также приведены установленные методом имитационного моделирования характеристики стойкости ТТС при разных вариантах отключения линий: φ_r , φ_u и $|\bar{\Phi}^*|$.

Наименьшее значение $|\bar{\Phi}^*|$ наблюдается у структурной схемы SSL_1 — это и есть наиболее уязвимый вариант отключения: ТТС подвержена наибольшему риску при возникновении нештатных ситуаций. Для принятых условий смешанного повреждения отключение всех потребителей произойдет при повреждении в среднем 1,1 узла и 1,7 трубопроводов.

Стойкость к повреждениям трубопроводных систем при ремонте отдельных производственных участков

Оценим стойкость транспортной системы к смешанному повреждению для различных вариантов очередного отключения производственных участков от действующей ТТС в ходе вывода их из эксплуатации и ремонта. Выявим, какой из вариантов отклю-



▲ Рис. 2. Расчетные характеристики стойкости системы для структурных схем трубопроводных систем с разными вариантами отключения от источника продукта производственных линий

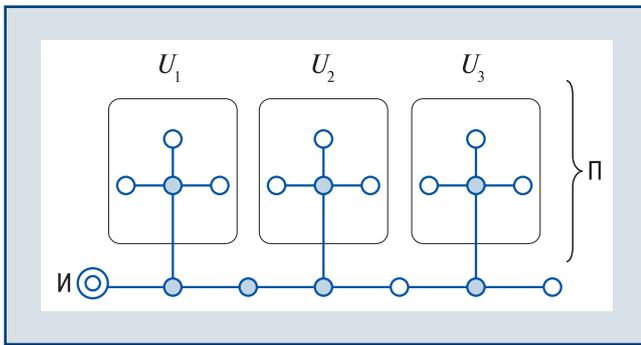
▲ Fig. 2. Design characteristics of the system stability for pipeline systems structural diagrams with different options of disconnecting from the product source of production lines

чения представляет наибольшую потенциальную опасность для всей системы.

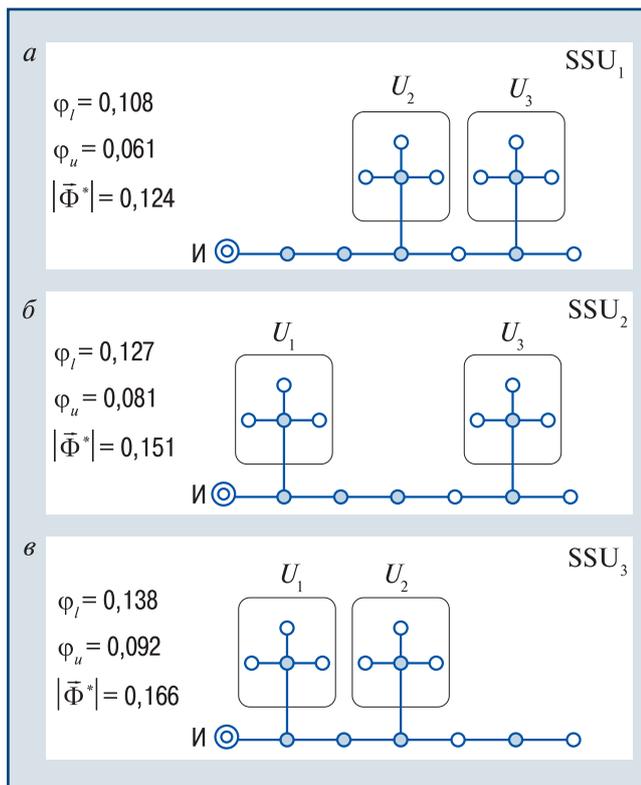
Отключение участков может сопровождаться возникновением потенциально опасных ситуаций, когда система в целом оказывается уязвимой к повреждениям элементов сетевой структуры. Рассмотрим структурную схему ТТС (рис. 3), предназначенную для обслуживания трех производственных участков, которые планируется выводить из режима эксплуатации по очереди — для замены технологического оборудования.

Возникающие при этом сетевые структуры SSU_1 (без первого участка), SSU_2 (без второго участка), SSU_3 (без третьего участка), показаны на рис. 4 и характеризуются равным числом узлов ($U = 15$), линейных элементов ($L = 14$) и потребителей продукта ($\Pi = 8$). Характеристики стойкости таких объектов для условий смешанного повреждения с циклограммой $T(1,1)$ можно корректно сравнивать между собой.

Установленные методом имитационного моделирования характеристики стойкости ТТС при разных вариантах отключения участков также приведены на



▲ Рис. 3. Структурная схема трубопроводной системы, обслуживающей технологическое оборудование трех производственных участков U_1, U_2, U_3
 ▲ Fig. 3. Structural diagram of the pipeline system servicing process equipment of three production sections U_1, U_2, U_3



▲ Рис. 4. Расчетные характеристики стойкости системы для структурных схем трубопроводных систем с разными вариантами отключения от источника продукта производственных участков
 ▲ Fig. 4. Design characteristics of the system stability for pipeline systems structural diagrams with different options of disconnecting from the product source of production sites

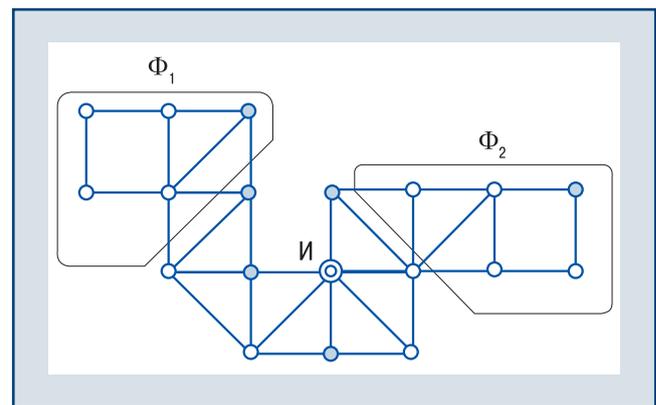
рис. 4. Видно, что наиболее уязвимым к смешанному повреждению оказывается вариант сетевой структуры SSU₁: при возникновении нештатной ситуации достаточно повредить в среднем 1,5 трубопровода и заблокировать 0,92 узла, чтобы все потребители отключились от источника.

Стойкость к повреждениям трубопроводных систем при исключении из их состава технологических фрагментов

Выявим фрагмент системы, консервация которого обеспечивает наиболее высокий уровень стойкости оставшейся части системы к смешанному повреждению.

Эксплуатация ТТС связана с необходимостью консервации некоторой ее части для создания резерва производственных мощностей. Для этого из состава системы выводится фрагмент, содержащий потребителей. Консервацию необходимо выполнить таким образом, чтобы в случае производственной необходимости сохранялась техническая готовность для оперативного восстановления первоначальной структуры.

На рис. 5 представлена структурная схема ТТС с фрагментами Φ_1 и Φ_2 , каждый содержит одинаковое число узлов, трубопроводов и потребителей: $U = 5, L = 9, \Pi = 4$.



▲ Рис. 5. Структурная схема трубопроводной системы с фрагментами Φ_1, Φ_2 , один из которых планируется перевести в режим консервации, отключив от источника продукта
 ▲ Fig. 5. Structural diagram of the pipeline system with fragments Φ_1, Φ_2 , one of which is planned to be switched to the conservation mode by disconnecting from the product source

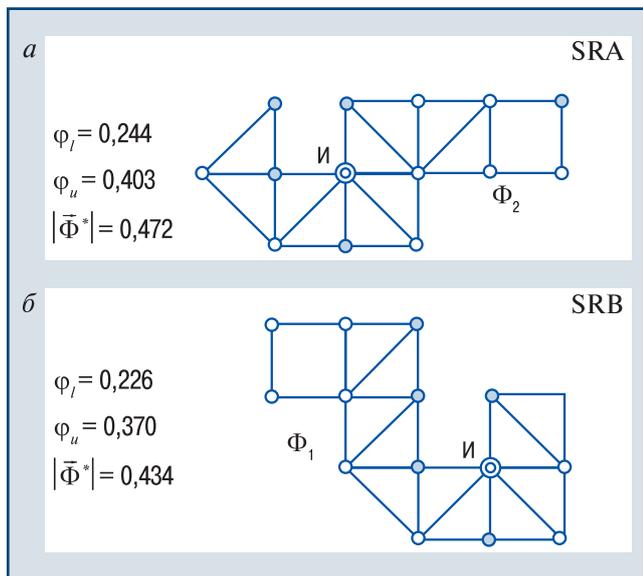
При исключении из системы фрагмента Φ_1 возникает сетевая структура SRA (рис. 6, а), при исключении фрагмента Φ_2 — сетевая структура SRB (рис. 6, б).

SRA, SRB содержат одинаковое число узлов, линейных элементов и потребителей: $U = 14, L = 24, \Pi = 8$. Если каждая схема подвергается смешанному повреждению с циклограммой $T(1,1)$, то сравнение соответствующих характеристик стойкости оказывается корректным. Результаты расчетов методом имитационного моделирования приведены на рис. 6.

Видно, что сетевая структура SRA обладает большей стойкостью к смешанным повреждениям ($|\bar{\Phi}^*| = 0,472$), следовательно, для резервной консервации следует использовать фрагмент Φ_1 .

Выводы

1. Изменение структурного состава трубопроводной системы при исключении отдельных ее частей



▲ Рис. 6. Структурные схемы трубопроводных систем SRA и SRB после несинхронного отключения фрагментов от источника продукта

▲ Fig. 6. Structural diagram of the pipeline system with fragments SRA and SRB after non-synchronous disconnection of fragments from the product source

изменяет характеристики стойкости системы. В штатных ситуациях могут произойти прогрессирующее повреждение, прогрессирующая блокировка или наиболее сложный сценарий развития аварии — смешанное повреждение, при котором случайным образом повреждаются как линейные, так и точечные структурные элементы.

2. Процесс смешанного повреждения характеризуется циклограммой $T(\alpha, \beta)$ с указанием числа повреждаемых случайным образом линейных элементов α и блокируемых транспортных узлов β в течение одного цикла воздействия на систему. Циклограмма позволяет:

установить порядок перехода в состояние неработоспособности отдельных линейных элементов и транспортных узлов в условиях циклического воздействия на систему;

определить количественный состав работоспособных элементов для каждого момента системного времени;

алгоритмизировать процедуру случайного повреждения сетевой структуры.

3. Сравнение характеристик стойкости сетевых структур оказывается корректным в том случае, если анализируемые системы имеют одинаковое число узлов, линейных элементов и потребителей целевого продукта, а также исследуются с одинаковой циклограммой.

4. Метод оценки стойкости сетевых структур к смешанному повреждению — метод имитационного моделирования — может быть использован при обосновании и планировании ремонтных работ, техобслуживания, реконструкции действующих систем

трубопроводного транспорта: для выбора рациональных схем несинхронного отключения от системы линий, участков или фрагментов.

Список литературы

1. Kleiber M. Process Engineering: Addressing the Gap between Studies and Chemical Industry. — Berlin, Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2016. — 424 p.
2. Mokhtab S., Poe W.A., Mak J.Y. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and practices. — Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2018. — 862 p.
3. Sambasivan M., Gopal S. Handbook of Oil and Gas Piping. A Practical and Comprehensive Guide. — Leiden: Taylor & Francis Group, 2019. — 147 p.
4. Baron H. The Oil & Gas Engineering Guide. — Paris: Editions Technip, 2015. — 270 p.
5. Stewart M.I. Surface Production Operations. Vol. III. Facility Piping and Pipeline Systems. — Waltham: Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2016. — 1108 p. DOI: 10.1016/C2009-0-20127-9
6. Ellenberger J.Ph. Piping and Pipeline Calculations Manual Construction. Design Fabrication and Examination. — Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 2014. — 398 p.
7. Nolan D.P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities. — Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2019. — 507 p.
8. Тарарычкин И.А., Нечаев Г.И. Обеспечение эффективного функционирования систем промышленного трубопроводного транспорта. — Луганск: Изд-во ВНУ им. В. Даля, 2012. — 263 с.
9. Кораблев Ю.А. Имитационное моделирование: учеб. пособие. — М.: КНОРУС, 2017. — 146 с.
10. Эльберг М.С., Цыганков Н.С. Имитационное моделирование: учеб. пособие. — Красноярск: СФУ, 2017. — 128 с.
11. Маликов Р.Ф. Практикум по компьютерному моделированию физических явлений и объектов: учеб. пособие. — Уфа: БашГПУ, 2005. — 291 с.
12. Поршнев С.В. Компьютерное моделирование физических процессов с использованием пакета Mathcad. — М.: Горячая линия — Телеком, 2004. — 319 с.
13. Охорзин В.А. Компьютерное моделирование в системе Mathcad: учеб. пособие. — М.: Финансы и статистика, 2006. — 144 с.
14. Иванов В.И., Панчиков В.Н. Техническое диагностирование и оценка риска аварии в нефтегазовой отрасли// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 1. — С. 68–71.
15. Махутов Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 2. Обоснование ресурса и безопасности. — Новосибирск: Наука, 2005. — 610 с.
16. Владов Ю.Р. Автоматизированная идентификация состояния трубопроводных систем в машиностроении: учеб. пособие. — Оренбург: ОГУ, 2005. — 101 с.
17. Тарарычкин И.А. Повышение стойкости трубопроводных систем к повреждениям транспортных узлов при развитии аварийных ситуаций// Безопасность

труда в промышленности. — 2019. — № 5. — С. 27–32.
DOI: 10.24000/0409-2961-2019-5-27-32

donbass_8888@mail.ru

Материал поступил в редакцию 15 января 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 73–78.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-73-78

Pipeline Systems Resistance to Damages under the Conditions of Repair and Reconstruction

I.A. Tararychkin, Dr. Sci. (Eng.), Prof., donbass_8888@mail.ru
Lugansk National University Named after V. Dahl, Lugansk, Ukraine

Abstract

Change of the pipeline systems structural composition in the conditions of repair and reconstruction may become the reason for their vulnerability in case of emergency situations. Transition to the state of inoperability even of a small number of the systems structural elements can be accompanied by disconnection from the source of some or even all the consumers of the end product. When planning and conducting repair and reconstruction of the pipeline systems, it is required take into account possible negative effect of structural changes on the behavior of such objects during development of an accident — resistance reduction.

The purpose of the work — assessment of the resistance to mixed damage of the pipeline systems in the conditions of reconstruction, repair of individual technological fragments.

Resistance was assessed by simulation modeling method. Resistance characteristics in the conditions of alternate accidental damage of linear and point structural elements are as follows: average share of linear elements, the damage of which leads to breaking the links of the source with all the consumers; the average share of transport nodes, when blocked, the link between the source and all the consumers is broken.

It is required to assess and consider the consequences of structural elements disconnection from the system during repairs. The possibilities of the developed method of simulation modeling are considered on the examples of assessment of the pipeline systems resistance during scheduled repair of production lines, sections, as well as in the conditions of reconstruction. The need in taking into account changes in the structure and assessing the properties of the pipeline systems in planning and organization of repair work is shown in the article.

Key words: pipeline, system, structure, damage, network, accident, resistance, simulation modeling method.

References

1. Kleiber M. Process Engineering: Addressing the Gap between Studies and Chemical Industry. Berlin, Boston: Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2016. 424 p.

2. Mokhatab S., Poe W.A., Mak J.Y. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing: Principles and practices. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2018. 862 p.

3. Sambasivan M., Gopal S. Handbook of Oil and Gas Piping. A Practical and Comprehensive Guide. Leiden: Taylor & Francis Group, 2019. 147 p.

4. Baron H. The Oil & Gas Engineering Guide. Paris: Editions Technip, 2015. 270 p.

5. Stewart M.I. Surface Production Operations. Vol. III. Facility Piping and Pipeline Systems. Waltham: Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2016. 1108 p DOI: 10.1016/C2009-0-20127-9

6. Ellenberger J.Ph. Piping and Pipeline Calculations Manual Construction. Design Fabrication and Examination. — Butterworth-Heinemann, Elsevier Inc., 2014. 398 p.

7. Nolan D.P. Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities. Gulf Professional Publishing, Elsevier Inc., 2019. 507 p.

8. Tararychkin I.A., Nechaev G.I. Ensuring the efficient functioning of industrial pipeline transport systems. Lugansk: Izd-vo VNU im. V. Dalya, 2012. 263 p. (In Russ.).

9. Korablev Yu.A. Simulation modeling: textbook. Moscow: KNORUS, 2017. 146 p. (In Russ.).

10. Elberg M.S., Tsygankov N.S. Simulation modeling: textbook. Krasnoyarsk: SFU, 2017. 128 p. (In Russ.).

11. Malikov R.F. Manual on computer modeling of physical phenomena and objects: textbook. Ufa: BashGPU, 2005. 291 p. (In Russ.).

12. Porshnev S.V. Computer simulation of physical processes using the Mathcad package. Moscow: Goryachaya liniya — Telekom, 2004. 319 p. (In Russ.).

13. Okhorzin V.A. Computer modeling in the Mathcad system: textbook. Moscow: Finansy i statistika, 2006. 144 p. (In Russ.).

14. Ivanov V.I., Panchikov V.N. Technical Diagnostics and Accident Risk Assessment in Oil and Gas Industry. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 1. pp. 68–71. (In Russ.).

15. Makhutov N.A. Structural strength, service life and technogenic safety. Pt. 2. Justification of the service life and safety. Novosibirsk: Nauka, 2005. 610 p. (In Russ.).

16. Vladov Yu.R. Automated identification of the pipeline systems condition in mechanical engineering: textbook. Orenburg: OGU, 2005. 101 p. (In Russ.).

17. Tararychkin I.A. Improvement of the Pipeline Systems Resistance to Damages of the Transport Nodes at the Development of Emergency Situations. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2019. № 5 pp. 27–32. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2019-5-27-32

Received January 15, 2020



Критерии допустимого социального риска при авариях на опасных производственных объектах



И.С. Жуков,
науч. сотрудник,
ilzhukov@safety.ru



М.В. Лисанов,
д-р техн. наук,
директор центра
анализа риска



Е.А. Самусева,
канд. техн. наук,
ст. науч.
сотрудник

АНО «Агентство исследований промышленных рисков», Москва, Россия

ЗАО НТЦ ПБ, Москва, Россия

Введение

Установление критериев допустимого (приемлемого) риска поражения людей при промышленных авариях и техногенных происшествиях является одной из широко обсуждаемых проблем в России [1–6] и за рубежом [7–12]. В качестве основного показателя в применяемых с этой целью критериях используется индивидуальный риск [13–16], в отдельных случаях, в том числе в [17, 18], для населения также и социальный риск, отражающий возможность возникновения крупных аварий.

Согласно п. 34 [19] одним из показателей, рекомендуемых для оценки риска аварий, является социальный риск $R_{\text{соц}}$. В соответствии с приложением 1 [19] социальный риск (или риск поражения группы людей) — зависимость частоты возникновения сценариев аварий F , в которых пострадало на определенном уровне не менее N человек, от этого числа; N — социальный риск, который характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации совокупности сценариев аварии и представляется в виде соответствующей F/N -кривой. Согласно п. 44 [19] социальный риск можно выразить в виде графика ступенчатой функции $F(x)$, задаваемой уравнением:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{N(x)} Q_i^x, \quad (1)$$

где $N(x)$ — число сценариев C_i , при которых гибнет не менее x человек; Q_i^x — ожидаемые частоты реали-

Проанализированы отечественные и зарубежные документы в области анализа риска, касающиеся социального риска при авариях на опасных производственных объектах. Предложено два подхода к установлению критериев допустимого социального риска при авариях на опасных производственных объектах.

Ключевые слова: опасный производственный объект, социальный риск, F/N -кривая, критерии, допустимый риск, приемлемый риск, авария, взрыв, гибель людей, анализ риска, требования промышленной безопасности, декларация промышленной безопасности, обоснование безопасности.

Для цитирования: Жуков И.С., Лисанов М.В., Самусева Е.А. Критерии допустимого социального риска при авариях на опасных производственных объектах// Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 79–86. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-79-86

зации аварийных ситуаций C_i , при которых гибнет не менее x человек.

При этом в [19] рекомендуется построение кривой социального риска в виде ступенчатой функции $F(x)$ со ступеньками в целочисленных значениях аргумента $x = [N_j]$, когда:

$$F([N_j]) = F(N_j) \frac{N_j}{[N_j]}, \quad (2)$$

где $[N_j]$ — ближайшее большее целое число к значению ожидаемого числа погибших N_j при реализации j -го сценария; $F(N_j)$ — сумма частот сценариев с ожидаемым числом погибших не менее N_j .

Социальный риск применяется при декларировании промышленной безопасности опасных производственных объектов (ОПО) в соответствии с требованиями п. 42 [20].

Соответствие критериям допустимого социального риска также может являться одним из условий при определении взрывоустойчивости зданий и сооружений на ОПО [21].

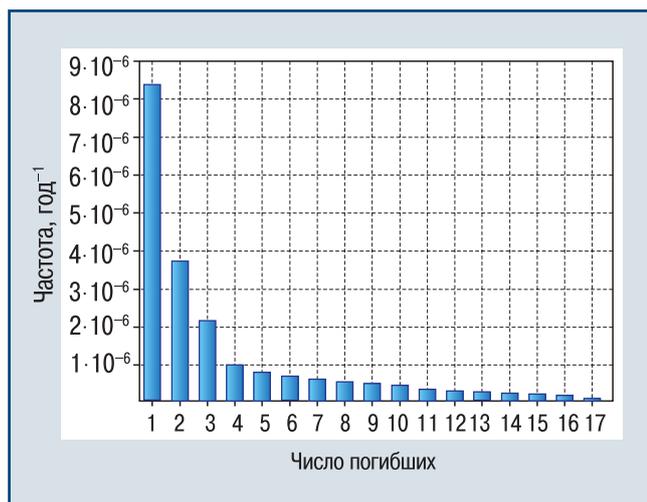
Однако в российских нормативно-методических документах в области промышленной безопасности условия допустимости, приемлемости социального риска отсутствуют.

Требования российских нормативно-методических документов

В российском законодательстве в области промышленной безопасности отсутствует критерий

допустимого социального риска, но подобные требования имеются в законодательстве в области пожарной безопасности. В [17] присутствуют критерии приемлемости социального пожарного риска. В пп. 4.1, 5 ст. 93 [17] отмечается, что величина социального пожарного риска для людей, находящихся в жилой, общественно-деловой зонах или зоне рекреационного назначения вблизи производственного объекта, должна находиться в пределах от $1 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹ до $1 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹, т.е. фактически критерии допустимого социального пожарного риска установлены только для третьих лиц вне территории производственного объекта. Критерии допустимого социального пожарного риска для персонала производственного объекта и для третьих лиц на территории производственного объекта в [17] также отсутствуют. Однако, в соответствии со ст. 2 [17], социальный пожарный риск — степень опасности, ведущей к гибели группы людей в результате воздействия опасных факторов пожара, т.е. при определении социального риска, согласно [17], учитываются только аварии, связанные с факторами пожара.

Пример кривой социального риска приведен на рис. 1.



▲ Рис. 1. Пример F/N -диаграммы
▲ Fig. 1. Example of F/N -diagram

Согласно [15, 16] социальный риск чрезвычайной ситуации (ЧС) — количественный показатель риска ЧС, определяемый как вероятность гибели на рассматриваемой территории за год одновременно более чем 10 человек в результате возможного воздействия всей совокупности поражающих факторов источников ЧС, а допустимый социальный риск ЧС — численное значение, являющееся критерием социального риска ЧС, характерных для определенной территории.

В соответствии с п. 4.4 [15] допустимый социальный риск ЧС для каждого субъекта Российской Федерации составляет $1 \cdot 10^{-5}$ год⁻¹. Социальный риск ЧС

считается недопустимым, если он более чем в 10 раз превышает допустимый социальный риск ЧС [15].

Из приведенного выше определения социального риска, в соответствии с [15, 16], следует, что при числе погибших в результате аварии менее 10 социальный риск равен нулю.

В [18] определение социального риска соответствует [19]. Согласно п. 13.5.2 [18] рассчитанные значения социального риска в виде F/N -кривой рекомендуется сравнивать со следующими функциями:

для населения:

$$F = 1 \cdot 10^{-2} / N^2 \text{ — для действующих ОПО; (3)}$$

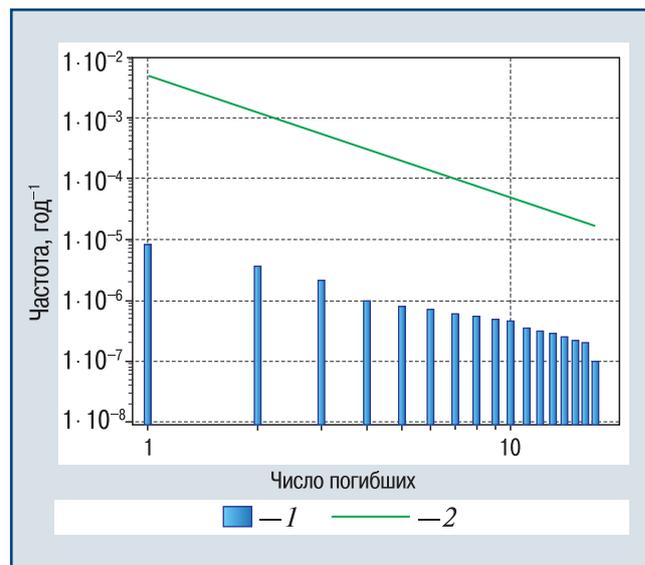
$$F = 1 \cdot 10^{-3} / N^2 \text{ — для проектируемых ОПО; (4)}$$

для персонала ОПО:

$$F = 5 \cdot 10^{-2} / N^2 \text{ — для действующих ОПО; (5)}$$

$$F = 5 \cdot 10^{-3} / N^2 \text{ — для проектируемых ОПО. (6)}$$

Социальный риск считается приемлемым, если построенные F/N -кривые лежат ниже функций, построенных по соответствующим уравнениям (3)–(6) (рис. 2, пример F/N -диаграммы, удовлетворяющей критериям [18], для персонала проектируемых ОПО, здесь I — расчетное значение социального риска; 2 — критерий допустимого социального риска).



▲ Рис. 2. Пример F/N -диаграммы
▲ Fig. 2. Example of F/N -diagram

Распространенной в настоящее время практикой является установление критериев допустимого социального риска для числа погибших $N = 10$. Тогда критерии [18] примут следующий вид:

для населения:

$$F = 1 \cdot 10^{-4} \text{ — для действующих ОПО;}$$

$F = 1 \cdot 10^{-5}$ — для проектируемых ОПО;

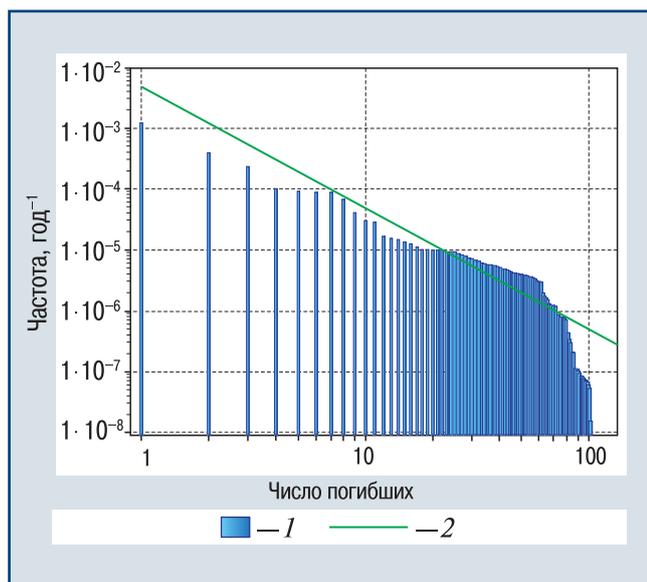
для персонала:

$F = 5 \cdot 10^{-4}$ — для действующих ОПО;

$F = 5 \cdot 10^{-5}$ — для проектируемых ОПО,

что согласуется с [15–17].

Однако определение социального риска только для числа погибших $N = 10$ на практике может привести к занижению оценки опасности аварий, так как наблюдаются случаи, когда социальный риск является допустимым для $N = 10$, т.е. F/N -кривая лежит ниже кривой критериев, а для числа погибших $N > 10$ F/N -кривая в одной или нескольких точках будет лежать выше кривой критериев, т.е. социальный риск будет недопустимым (рис. 3, здесь 1, 2 — то же, что на рис. 2).



▲ Рис. 3. Пример F/N -диаграммы, не удовлетворяющей критериям [18], для персонала проектируемых ОПО при $N > 10$

▲ Fig. 3. Example of F/N -diagram that does not meet the criteria [18] for the personnel of the designed hazardous production facilities at $N > 10$

Общественный резонанс, вызванный аварией на ОПО, растет тем сильнее, чем большее число погибших наблюдается в результате аварии, поэтому с учетом вышеизложенных фактов при определении приемлемости социального риска необходимо рассматривать всю F/N -кривую, а не только значение социального риска при 10 погибших.

Однако для многих крупных объектов выполнение данных критериев может быть невозможным вследствие существенной зависимости социального риска от массы обрабатываемых на производстве опасных веществ, соответствующего увеличения источников (частоты) аварии и увеличения числа пораженных людей (в отличие от удельного показателя

индивидуального риска). В этом случае рассчитанная F/N -кривая может находиться выше кривой критериев допустимости даже при самых совершенных мерах безопасности.

Зарубежные требования

Один из наиболее известных зарубежных критериев допустимого социального риска установлен Министерством жилищного строительства, планирования землепользования и охраны окружающей среды Нидерландов (VROM) [7, 8]:

$$F < 1 \cdot 10^{-3} / N^2. \quad (7)$$

Как видно, предлагаемый в [18] критерий допустимости социального риска взят именно из VROM.

В [7] предлагается более общий критерий допустимого социального риска, установленного в VROM:

$$F < \frac{\left(\frac{100\beta_i}{k\sqrt{N_{A_i}}} \right)^2}{N^2}, \quad (8)$$

где β_i — политический фактор или, как он определен авторами, степень добровольности, с которой выполняется i -й вид деятельности и с какой выгодой он воспринимается, β_i принимает значения от 10 для случаев, когда связанная с риском деятельность осуществляется целиком и полностью добровольно и приносит выгоду только рискующему, например, альпинизм — до 0,01 в случае навязанного риска без какой-либо ощутимой выгоды (в [7] отмечается, что для случаев эксплуатации взрывопожароопасных и химически опасных объектов данный коэффициент равен 0,03); k — коэффициент неприятия риска, представляющий собой значение, показывающее во сколько раз должно быть увеличено среднеквадратичное отклонение при математическом моделировании неприятия риска, $k = 3$ для случаев эксплуатации взрывопожароопасных и химически опасных объектов [7]; N_{A_i} — число независимых мест, где выполняется i -й вид деятельности, $N_{A_i} = 110$ для случаев эксплуатации взрывопожароопасных и химически опасных объектов в Нидерландах [7].

Согласно [7], если подставить вышеуказанные значения коэффициентов в выражение (8), то в результате получится выражение (7) (критерий VROM), т.е. утверждается, что критерий VROM является частным случаем критерия [7].

Также, в соответствии с [7], критерий допустимого социального риска необходимо пересматривать каждые 10 лет, актуализируя число эксплуатируемых взрывопожароопасных и химически опасных объектов N_{A_i} . Однако зависимость допустимого социального риска от числа ОПО кажется очень сомнительной, так как, варьируя значения N_{A_i} , нетрудно заметить, что при увеличении числа ОПО (напри-

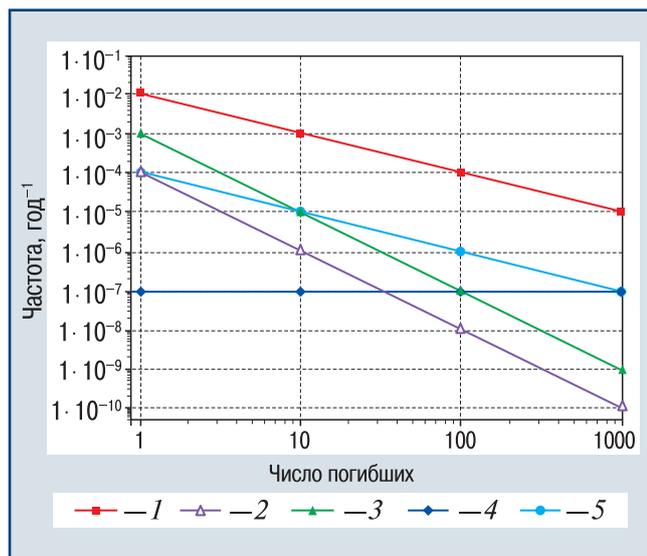
мер, при дроблении предприятий или изменении критериев идентификации ОПО) критерий допустимого социального риска будет уменьшаться, т.е. ужесточаться, а при уменьшении — увеличиваться, т.е. ослабляться.

Согласно [8] критерий допустимого социального риска в Чехии идентичен VROM для действующих объектов и в 10 раз меньше, чем VROM для новых объектов, а во Франции критерий допустимого социального риска не зависит от числа погибших и равен $1 \cdot 10^{-7}$ год⁻¹.

В Британском органе по охране труда и промышленной безопасности (HSE) [9] критерий допустимого социального риска представляет собой прямую с углом наклона -1 , проведенную через точку $N = 50$ погибших и $F(50) = 2 \cdot 10^{-4}$ год⁻¹.

Британский институт стандартов (BSI) [10] рекомендует применять критерий, установленный в HSE [9], однако, в соответствии с принципом ALARP, выделяют также и область условно приемлемого социального риска, нижняя граница которой представляет собой прямую, параллельную прямой критериев HSE [9], но расположена на два порядка ниже.

Пример применяемых за рубежом критериев допустимого социального риска приведен на рис. 4 (здесь 1 — Великобритания (HSE); 2 — Чехия; 3 — Нидерланды; 4 — Франция; 5 — Великобритания (BSI)).



▲ Рис. 4. Критерии допустимого социального риска в различных странах Европы

▲ Fig. 4. Criteria for tolerable social risk in various European countries

Кроме того, в HSE [9] наряду со стандартным показателем социального риска и его представлением в виде F/N -кривой используется также интеграл риска. Согласно HSE [9] интеграл риска — это суммарный показатель общего уровня социального риска, учитывающий весь набор пар $F-N$. При этом вклад числа погибших N в интеграл риска увеличивается с ростом самого числа погибших N :

$$RI = \sum [F(N) N^\alpha], \quad (9)$$

где RI — интеграл риска; α — масштабирующий индекс или фактор неприятия риска, находящийся обычно в диапазоне от 1 до 2.

Из выражения (9) видно, что аварии с большим числом погибших вносят более значительный вклад в суммарный уровень риска, что хорошо отражает уже упомянутый факт: общественный резонанс, вызванный аварией на ОПО, растет тем сильнее, чем большее число погибших наблюдается в результате аварии.

В нормативной документации Великобритании «Контроль за основными опасными производственными факторами» (англ. Control of Major Accident Hazards Regulations, COMAH) установлено значение $\alpha = 1,4$, а в HSE [9] — $\alpha = 2$.

Также, проанализировав выражение (9), легко заметить, что при $\alpha = 1$ интеграл риска равен коллективному риску HSE [9]. Исходя из этого факта, в [8] предлагается иной подход к установлению допустимого социального риска:

$$N_{\max} R_{\text{инд.доп}} = \sum [F(N) N^\alpha], \quad (10)$$

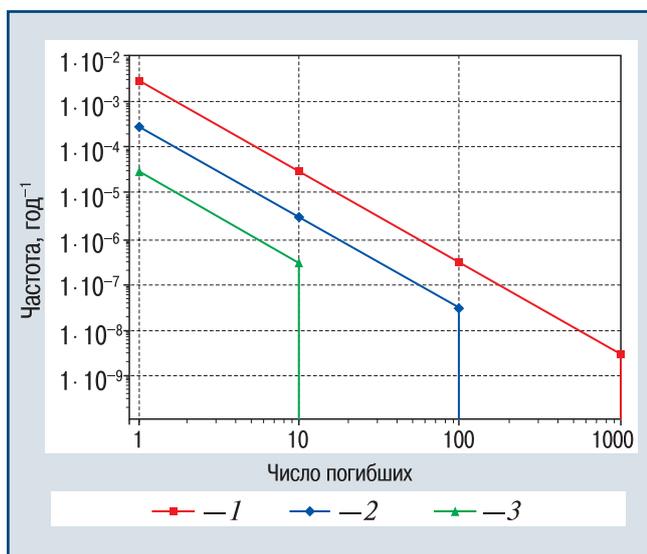
где N_{\max} — максимальное число людей, которое может быть подвержено воздействию поражающих факторов всех возможных аварий на объекте; $R_{\text{инд.доп}}$ — допустимый уровень индивидуального риска.

Согласно [8] принимается, что $\alpha = 2$. При этом социальный риск рассматривается отдельно для трех различных зон риска: внутренней (ближайшая к источнику опасности), средней и внешней, характеризующихся различным числом людей, которые могут быть подвержены воздействию поражающих факторов всех возможных аварий на объекте: $N_{\max} = 10, 100$ и 1000 соответственно. Допустимый индивидуальный риск, в соответствии с [8], берется равным для всех трех зон и принимается на уровне $3 \cdot 10^{-6}$ год⁻¹.

Пример применяемых в [8] критериев социального риска приведен на рис. 5 (здесь 1 — внешняя зона ($N_{\max} = 1000$); 2 — средняя зона ($N_{\max} = 100$); 3 — внутренняя зона ($N_{\max} = 10$)).

Методика определения допустимого социального риска

Для определения критериев допустимого социального риска на ОПО предлагается два подхода. В основе каждого из подходов лежат разбиение ОПО на составляющие и построение F/N -диаграмм не для всего ОПО в целом, а отдельно для каждой составляющей. Разбиение на составляющие, в том числе и для недекларируемых объектов, должно выполняться точно по таким же принципам, как и при декларировании промышленной безопасности [20, 22]. При этом третьи лица, которые могут находиться на территории ОПО или его составляющей (например, работники сервисных или государственных органи-



▲ Рис. 5. Новые критерии допустимого социального риска согласно HSE
▲ Fig. 5. New criteria for tolerable social risk according to HSE

заций), приравниваются к персоналу, так как при нахождении на территории для выполнения каких-либо работ или с иными целями они добровольно принимают на себя такие же риски, как и работники ОПО.

В качестве первого подхода предлагается использование критериев допустимого социального риска, предложенных в [7, 18]. Данный подход является одним из наиболее консервативных и иногда применяется на практике.

В качестве альтернативного варианта предлагается взять за основу подход, предложенный в [8], основанный на выражении (10), адаптировав его к принятым в настоящее время в Российской Федерации подходам к анализу опасностей и оценке риска.

Фактор неприятия риска α , как и в [9], из соображений применения более консервативного подхода и ввиду отсутствия необходимых статистических данных для его оценки предлагается взять равным 2.

Территорию, на которой оценивается социальный риск, как и в [8], предлагается не разбивать на три зоны, как в [8], а рассмотреть только две зоны:

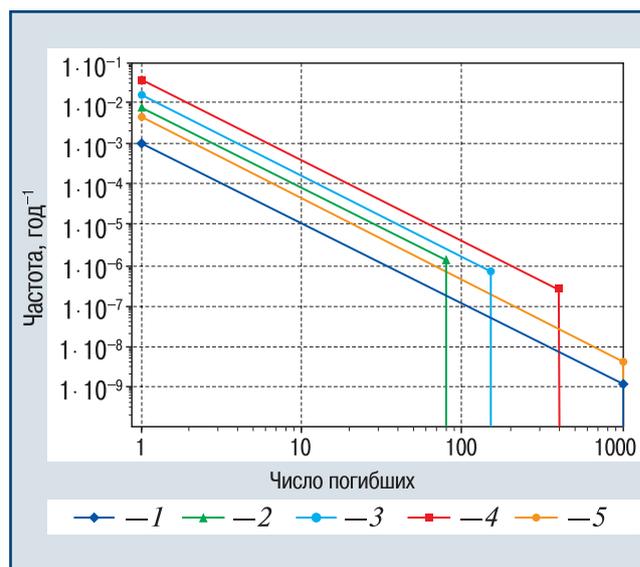
территорию ОПО, где $N_{\text{макс}}$ равен числу людей, включая третьих лиц, на территории ОПО, для которой устанавливается допустимый индивидуальный риск $1 \cdot 10^{-4} \text{ год}^{-1}$;

территорию за границами ОПО, где $N_{\text{макс}}$ равен числу людей, попадающих в зону действия поражающих факторов аварий на ОПО, для которой устанавливается допустимый индивидуальный риск $1 \cdot 10^{-6} \text{ год}^{-1}$.

В качестве $N_{\text{макс}}$ можно принять максимально возможное количество потерпевших для целей страхования ответственности согласно [19].

Таким образом, в предлагаемом подходе, учитывающем допустимое значение индивидуального риска, а также (косвенно) и расчетное значение коллектив-

ного риска, критериальный вид F/N -кривых будет меняться в зависимости от каждого конкретного рассматриваемого ОПО и его окружения, что позволит снизить зависимость социального риска от массы обрабатываемых на производстве опасных веществ, соответствующего увеличения источников (частоты) аварии и увеличения числа пораженных людей. Пример критериев допустимого социального риска для ОПО с различным числом людей представлен на рис. 6 (здесь 1 — 1000 чел. за территорией ОПО, [18] для населения; 2 — 80 чел. на территории ОПО; 3 — 150 чел. на территории ОПО; 4 — 400 чел. на территории ОПО; 5 — [18] для персонала), также для сравнения приведены критерии согласно [7, 18].



▲ Рис. 6. Пример предлагаемых критериев допустимого социального риска
▲ Fig. 6. Example of proposed criteria for tolerable social risk

Заклучение

На основе анализа отечественных и зарубежных нормативно-методических документов предложено два подхода к установлению критериев допустимого социального риска. Первый подход основан на «нидерландских» критериях [7, 18], второй — на «британских» [8] и учитывает специфику каждого конкретного опасного производственного объекта, его разделение на составляющие, а также требования к допустимому индивидуальному риску для персонала опасного производственного объекта и третьих лиц. Предложенные критерии позволят избежать проблемы, когда на площадках опасных производственных объектах с большой плотностью расположения оборудования и большим числом персонала социальный риск практически всегда будет являться недопустимым, при этом предлагаемый подход, не занижая степени опасности аварий, позволяет учитывать риск аварий с повышенным числом погибших.

Обоснование критериев допустимого риска согласно [23] следует реализовывать при разработке

обоснования безопасности опасного производственного объекта.

Список литературы

1. Лисанов М.В. О техническом регулировании и критериях приемлемого риска// Безопасность труда в промышленности. — 2004. — № 5. — С. 11–14.

2. Дегтярев Д.В., Печеркин А.С. Проблемы методологии оценки социального риска. Применение формулы Бернулли// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 11. — С. 50–53.

3. Гражданкин А.И., Печеркин А.С., Николаенко О.В. Об установлении допустимых уровней риска аварии для оценки достаточности компенсирующих мероприятий в обосновании безопасности опасного производственного объекта нефтегазового комплекса// Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 12. — С. 51–57. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-12-51-57

4. Совершенствование основ и процессов проектирования, строительства и эксплуатации производств переработки нефти и газа, нефтехимии и газохимии через изменение в регулировании промышленной безопасности/ О.В. Николаенко, А.Н. Черноплеков, И.А. Заикин, А.С. Крюков// Безопасность труда в промышленности. — 2012. — № 4. — С. 44–51.

5. Тимофеев С.С., Хамидуллина Е.А., Дроздова Т.И. Оценка аварийных рисков на химически опасных объектах Иркутской области// Вектор науки ТГУ. — 2013. — № 3. — С. 273–275.

6. Критерии допустимого риска при декларировании промышленной безопасности и обосновании безопасности опасного производственного объекта/ О.И. Борно, А.Ю. Семенов, Д.Б. Илюшин, Д.Г. Квашнин// Нефтегазовое дело. — 2015. — № 2. — С. 446–456.

7. Vrijiling J.K., van Hengel W., Houben R.J. A framework for risk evaluation// Journal of Hazardous Materials. — 1995. — № 43. — P. 245–261.

8. Trbojevic V.M. Risk criteria in EU. URL: <https://www.risk-support.co.uk/B26P2-Trbojevic-final.pdf> (дата обращения: 22.02.2020).

9. Societal Risk: Initial Briefing to the Societal Risk Technical Advisory Group (HSE RR703). URL: https://www.researchgate.net/publication/309135869_Societal_Risk_Initial_Briefing_to_the_Societal_Risk_Technical_Advisory_Group_HSE_RR703 (дата обращения: 22.02.2020).

10. PD 8010-1:2004. Pipeline systems. Steel pipelines on land — Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables. Part 3. — London: BSI Standards Limited, 2013. — 52 p.

11. Jongejan R.B., Jonkman S.N., Maaskant B. The potential use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 1): Basic principles. URL: <https://edepot.wur.nl/139614> (дата обращения: 22.02.2020).

12. Maaskant B., Jonkman S.N., Jongejan R.B. The use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 2): estimation of the individual and societal risk for the dike rings in the Netherlands. URL: <https://edepot.wur.nl/139617> (дата обращения: 22.02.2020).

nl/139617 (дата обращения: 22.02.2020).

13. Правила безопасности опасных производственных объектов подземных хранилищ газа: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. — Сер. 08. — Вып. 37. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2019. — 32 с.

14. Правила безопасности объектов сжиженного природного газа: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. — Сер. 08. — Вып. 41. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2020. — 36 с.

15. ГОСТ Р 22.10.02—2016. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Допустимый риск чрезвычайных ситуаций. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200136698> (дата обращения: 22.02.2020).

16. ГОСТ Р 55059—2012. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Менеджмент риска чрезвычайной ситуации. Термины и определения. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200102321> (дата обращения: 22.02.2020).

17. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности (с изменениями на 27 дек. 2018 г.). URL: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 22.02.2020).

18. СТО Газпром 2-2.3-400—2009. Методика анализа риска для опасных производственных объектов газодобывающих предприятий ОАО «Газпром». — М.: ООО «Газпром экспо», 2010. — 369 с.

19. Методические основы по проведению анализа опасностей и оценки риска аварий на опасных производственных объектах: рук. по безопасности. — Сер. 27. — Вып. 16. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2020. — 56 с.

20. РД-03-14—2005. Порядок оформления декларации промышленной безопасности опасных производственных объектов и перечень включаемых в нее сведений. — Сер. 27. — Вып. 4. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2018. — 28 с.

21. Лисанов М.В., Жуков И.С., Базалий Р.В. Критерии взрывоустойчивости зданий и сооружений на опасных производственных объектах// Безопасность труда в промышленности. — 2019. — № 5. — С. 40–46. DOI: 10.24000/0409-2961-2019-5-40-46

22. РД 03-357—00. Методические рекомендации по составлению декларации промышленной безопасности опасного производственного объекта. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200029036> (дата обращения: 22.02.2020).

23. Общие требования к обоснованию безопасности опасного производственного объекта: федер. нормы и правила в обл. пром. безопасности. — Сер. 03. — Вып. 73. — М.: ЗАО НТЦ ПБ, 2020. — 16 с.

ilzhukov@safety.ru

Материал поступил в редакцию 18 марта 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 79–86.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-79-86

Criteria for Tolerable Social Risk in case of Accidents at Hazardous Production Facilities

I.S. Zhukov, Research Associate, ilzhukov@safety.ru
ANO «Industrial Risk Research Agency», Moscow, Russia

M.V. Lisanov, Dr. Sci. (Eng.), the Director of Risk Analysis Center

E.A. Samuseva, Cand. Sci. (Eng.), Senior Research Assistant
STC «Industrial Safety» CJSC, Moscow, Russia

Abstract

Establishing the criteria for a tolerable (acceptable) risk of people exposure in case of industrial accidents and technogenic events is one of the widely discussed problems in Russia and abroad. As the main indicator in the criteria used for this purpose, an individual risk is applied, in some cases, including for the population, and, also social risk, reflecting the possibility of major accidents.

According to paragraph 34 of Safety Guide «Methodological framework for conducting hazard analysis and risk assessment of accidents at hazardous production facilities», one of the indicators recommended for accident risk assessment is social risk. Social risk (or the risk of group of people exposure) is the dependence of the frequency of accident scenarios F in which suffered at a certain level at least N people from this number (N characterizes the social severity of the consequences (catastrophic) of the implementation of the totality of accident scenarios and is presented in the form corresponding to F/N curve).

Social risk is applied when declaring industrial safety of hazardous production facilities in accordance with paragraph 42 of RD-03-14—2005, «Procedure for presentation of industrial safety declaration of hazardous production facilities, and the list of information to be included in it».

Compliance with the criteria of tolerable social risk is one of the conditions when determining the blast resistance of buildings and structures at hazardous production facilities.

Based on the analysis of domestic and foreign regulatory and methodological documents, two approaches in establishing the criteria for tolerable social risk are proposed. The first approach is based on the «Dutch» criteria. The second approach is based on «British» criteria and takes into account the specifics of a particular object, its division into components, requirements for tolerable individual risk. The proposed criteria will allow to avoid the problem when at the site facilities with a high density of equipment location and a large number of personnel the social risk practically will be always unacceptable. The proposed approach does not underestimate the risk of accident and takes into account the stronger effect on the risk of accidents with an increased death toll.

Key words: hazardous production facility, social risk, F/N curve, criteria, tolerable risk, acceptable risk, accident, explosion, loss of life, risk analysis, industrial safety requirements, industrial safety declaration, Safety case.

References

1. Lisanov M.V. On technical regulation and acceptable risk criteria. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2004. № 5. pp. 11–14. (In Russ.).
2. Degtyarev D.V., Pecherkin A.S. Methodology Problems of Social Risk Assessment. Use of Bernoulli Formula. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 11. pp. 50–53. (In Russ.).
3. Grazhdankin A.I., Pecherkin A.S., Nikolaenko O.V. On the Establishment of the Tolerable Risk Levels of Accident for Assessment of Compensatory Measures Sufficiency in Substantiation of Safety of Hazardous Production Facility of Oil and Gas Complex. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2017. № 12. pp. 51–57. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2017-12-51-57
4. Nikolaenko O.V., Chernoplekov A.N., Zaikin I.A., Kryukov A.S. Improvement of the Bases and Processes of Design, Construction and Operation of Oil and Gas Processing Facilities, Petrochemical and Gas Chemical Plants through the Changes in Industrial Safety Regulation. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2012. № 4. pp. 44–51. (In Russ.).
5. Timofeev S.S., Khamidullina E.A., Drozdova T.I. Assessment of accidental risks at chemically hazardous facilities of the Irkutsk region. *Vektor nauki TGU = Science Vector of Togliatti State University*. 2013. № 3. pp. 273–275. (In Russ.).
6. Borno O.I., Semenov A.Yu., Ilyushin D.B., Kvashnin D.G. Criteria for acceptable risk when declaring industrial safety and justifying safety of a hazardous production facility. *Neftegazovoe delo = Oil and gas business*. 2015. № 2. pp. 446–456. (In Russ.).
7. Vrijiling J.K., van Hengel W., Houben R.J. A framework for risk evaluation. *Journal of Hazardous Materials*. 1995. № 43. 245–261.
8. Trbojevic V.M. Risk criteria in EU. Available at: <https://www.risk-support.co.uk/B26P2-Trbojevic-final.pdf> (accessed: February 22, 2020).
9. Societal Risk: Initial Briefing to the Societal Risk Technical Advisory Group (HSE RR703). Available at: https://www.researchgate.net/publication/309135869_Societal_Risk_Initial_Briefing_to_the_Societal_Risk_Technical_Advisory_Group_HSE_RR703 (accessed: February 22, 2020).
10. PD 8010-1:2004. Pipeline systems. Steel pipelines on land — Guide to the application of pipeline risk assessment to proposed developments in the vicinity of major accident hazard pipelines containing flammables. Part 3. London: BSI Standards Limited, 2013. 52 p.
11. Jongejan R.B., Jonkman S.N., Maaskant B. The potential use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 1): Basic principles. Available at: <https://edepot.wur.nl/139614> (accessed: February 22, 2020).
12. Maaskant B., Jonkman S.N., Jongejan R.B. The use of individual and societal risk criteria within the Dutch flood safety policy (part 2): estimation of the individual and societal risk for the dike rings in the Netherlands. Available at: <https://edepot.wur.nl/139617> (accessed: February 22, 2020).
13. Safety rules for hazardous production facilities of the underground gas storage facilities: Federal rules and regulations in the field of industrial safety. Ser. 08. Iss. 37. Moscow: ZAO NTTs PB, 2019. 32 p. (In Russ.).
14. Safety rules for liquefied natural gas facilities: Federal rules and regulations in the field of industrial safety. Ser. 08. Iss. 41. Moscow: ZAO NTTs PB, 2020. 36 p. (In Russ.).
15. GOST R 22.10.02—2016. Safety in emergency situations. Emergency situations risk management. Acceptable risk of emergency situations. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200136698> (accessed: February 22, 2020). (In Russ.).
16. GOST R 55059—2012. Safety in emergency situations. Emergency risk management. Terms and definitions. Available

at: <http://docs.cntd.ru/document/1200102321> (accessed: February 22, 2020). (In Russ.).

17. Technical regulation on fire safety requirements (as amended on December 27, 2018). Available at: <http://docs.cntd.ru/document/902111644> (accessed: February 22, 2020). (In Russ.).

18. STO Gazprom 2-2.3-400—2009. Risk analysis methodology for hazardous production facilities of gas producing enterprises of OAO Gazprom. Moscow: ООО «Gazprom экспо», 2010. 369 p. (In Russ.).

19. Methodological foundations for hazard analysis and risk assessment of accidents at hazardous production facilities: Safety guide. Ser. 27. Iss. 16. Moscow: ZAO NTTs PB, 2020. 56 p. (In Russ.).

20. RD-03-14—2005. Procedure for presentation of industrial safety declaration of hazardous production facilities and the list

of information to be included in it. Ser. 27. Iss. 4. Moscow: ZAO NTTs PB, 2018. 28 p. (In Russ.).

21. Lisanov M.V., Zhukov I.S., Bazaliy R.V. Criteria for Buildings and Structures Blast Resistance at Hazardous Production Facilities. *Bezopasnost truda v promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2019. № 5. pp. 40–46. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2019-5-40-46

22. RD 03-357—00. Guidelines for the preparation of industrial safety declaration of a hazardous production facility. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200029036> (accessed: February 22, 2020). (In Russ.).

23. General requirements for safety case of hazardous production facility: Federal rules and regulations in the field of industrial safety. Ser. 03. Iss. 73. Moscow: ZAO NTTs PB, 2020. 16 p. (In Russ.).

Received March 18, 2020

Пожарная безопасность (научно-технический журнал)

Шебеко Ю.Н., Шебеко А.Ю., Зубань А.В. Определение требуемой толщины вспучивающегося огнезащитного покрытия на стальных конструкциях для заданных пределов огнестойкости. — 2020. — № 1.

Проанализирована взаимосвязь разброса значений пределов огнестойкости стальных конструкций со вспучивающимися огнезащитными покрытиями и соответствующего этому разбросу интервала толщины огнезащитного покрытия. Предложена методика, на основании которой может быть осуществлен выбор необходимой толщины огнезащитного покрытия в зависимости от заданных значений дисперсии предела огнестойкости и приведенной толщины конструкции при заданной доверительной вероятности.

Вогман Л.П., Простов Е.Е. Экспериментальные исследования и расчет условий теплового самовозгорания отработанного активного угля марки СКД. — 2020. — № 1.

По предшествующей (1989 г.) и новой (2018 г.) методикам определены условия теплового самовозгорания отработанного активного угля марки СКД. Новая методика, в отличие от предшествующей, учитывает кинетику процесса, позволяет рассчитывать условия самовозгорания для различных реальных геометрических форм и размеров горючих материалов при их хранении и транспортировании. Результаты расчетов могут быть использованы при прогнозировании и для предотвращения пожаров при хранении и транспортировании твердых дисперсных горючих веществ и материалов. Например, выполненные расчеты условий теплового самовозгорания отработанного активного угля марки СКД при транспортировании в вагонах-хопперах размерами 2,64×2 и 112×13,37 м, смонтированных на железнодорожных платформах,

по территории России (с учетом максимальной летней температуры 40 °С), показали, что самовозгорания произойти не может. Исследование условий теплового самовозгорания отработанного активного угля марки СКД проводилось в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 12.1.044—2018.

Огнестойкость железобетонной конструкции с деформационным швом при знакопеременных нагрузках/ В.А. Прусаков, М.В. Гравит, А.В. Пехотиков и др. — 2020. — № 1.

Правильное проектирование, устройство и монтаж деформационных швов дают возможность обеспечить длительный срок службы основных несущих и ограждающих конструкций зданий, а также элементов внутренней и внешней отделки. Огнестойкие заполнения устанавливаются для компенсации возможных изменений ширины шва от первоначальной ширины в горизонтальные и вертикальные деформационные швы монолитных и сборных железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения, а также в зазоры между торцом вертикальных стен и межэтажных перекрытий. Для защиты деформационных швов в конструкциях зданий и сооружений от воздействия пожара применяются огнестойкие заделки. В европейских нормативных документах такие противопожарные барьеры специально разрабатываются для применения в деформационных швах и работают при сжатии, растяжении и сдвиге шва. В России изделия и материалы, выполняющие функцию противопожарного барьера, не испытываются в условиях знакопеременной нагрузки. В статье приведена методика испытаний на огнестойкость для деформационного шва в железобетонной конструкции. Получены результаты по параметрам целостности и теплоизолирующей способности для железобетонных плит с учетом последующего увеличения ширины зазора между плитами и сдвига их относительно друг друга на 25 %.

Потенциальные риски потерь нефтепродуктов при хранении и анализ путей их снижения

Г.Г. Васильев, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой, srgnpr@gubkin.ru, И.А. Леонович, канд. техн. наук, доцент, С.Н. Левин, ст. преподаватель, В.М. Писаревский, д-р техн. наук, проф. (ФГАОУ ВО «РГУ нефти и газа (НИУ) им. И.М. Губкина», Москва, Россия)

Проведены анализ и оценка потенциальных потерь нефтепродуктов при хранении в рамках системы нефтепродуктообеспечения Российской Федерации. Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на применение тех или иных методов борьбы с потерями для наиболее распространенных конструкций резервуаров. Проанализирован подход к нормированию потерь нефтепродуктов в Российской Федерации, предложена методика оценки потенциальных потерь и ущерба. Рассмотрены возможные варианты реализации методики снижения потерь на резервуарах, где применение широко распространенных средств нецелесообразно.

Ключевые слова: потери, нефтепродукты, хранение нефтепродуктов, резервуар, микрошарики, гранулированное пеностекло.

Для цитирования: Васильев Г.Г., Леонович И.А., Левин С.Н., Писаревский В.М. Потенциальные риски потерь нефтепродуктов при хранении и анализ путей их снижения // Безопасность труда в промышленности. — 2020. — № 5. — С. 87–93. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-87-93

Введение

Повышение безопасности и эффективности функционирования нефтегазовой промышленности в Российской Федерации (РФ) является основополагающей задачей всех участников технологического цикла добычи, транспортировки, переработки и реализации углеводородной продукции. На каждом из этапов предусмотрены те или иные мероприятия для достижения данных целей. В то же время могут складываться объективные условия, при которых определенный уровень экономических потерь и потенциальный уровень опасности признаются допустимыми, а иногда и прямо нормируются. Примером реализации такого подхода является нормирование потерь нефтепродуктов при их хранении. С точки зрения экономической эффективности потери — это прямой ущерб, а с точки зрения безопасности — потенциальный источник поражающего воздействия, но в практической деятельности организаций определенный уровень потерь считается приемлемым, а в рамках государственного регулирования существуют нормативные документы, устанавливающие приемлемые нормы таких потерь.

Россия является одним из лидеров по добыче нефти в мире, находясь в первой тройке добывающих стран вместе с Саудовской Аравией и США. Темпы роста добычи нефти в России за последние 10 лет представлены на рис. 1 [1].

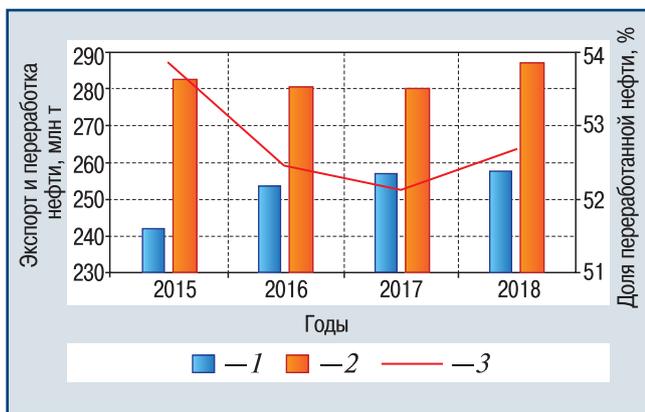


▲ Рис. 1. Добыча нефти (включая газовый конденсат) в России по годам, млн т

▲ Fig. 1. Oil production (including gas condensate) in Russia by years, million tons

Значительная часть (около 53 %) нефти идет на переработку внутри страны — данные об экспорте нефти и нефтепереработке представлены на рис. 2 (здесь 1 — экспорт; 2 — переработка; 3 — доля переработки в добыче) [2].

Нефтепереработка является одной из ключевых отраслей нефтегазовой промышленности России. За последние десять лет при стабильном финансировании удалось добиться существенного роста глубины переработки нефтяного сырья (в 2018 г. — 82,7 %), но это значение все еще отстает от мирового уровня (89–99 %). По итогам 2018 г. объем производства ав-



▲ Рис. 2. Доля (в %) переработки нефти в добыче России, млн т

▲ Fig. 2. Share (in %) of oil refining in the production of Russia, million tons

томобильного бензина в России составил 39,42 млн т, дизельного топлива — 78,23 млн т, топочного мазута — 47,98 млн т [3].

Нефтепродукты частично идут на экспорт, частично потребляются на территории РФ. В 2018 г. экспортировано 150,3 млн т нефтепродуктов (рост на 1,3 % по сравнению с 2017 г.), из которых на страны дальнего зарубежья и СНГ приходится 92,7 % и 7,3 % соответственно. Россия сократила в 2018 г. экспорт бензина на 3 % по сравнению с показателем предшествующего года — до 4,21 млн т [4]. Экспорт дизельного топлива увеличился на 7,6 % и составил 54,798 млн т. Экспорт мазута снизился с 40 до 38 млн т. Объем импорта нефтепродуктов по-прежнему незначителен [4].

Оценивая перспективную тенденцию развития данной отрасли, Правительство РФ в своем прогнозе на 2024 г. (2022 г.) по сравнению с 2018 г. ожидает [5]: увеличение производства автомобильного бензина до 46,2 млн т (45,1 млн т в 2022 г.), увеличение производства дизельного топлива до 85,3 млн т (85,3 млн т в 2022 г.), увеличение выработки топлива для реактивных двигателей до 16,8 млн т (16,8 млн т в 2022 г.), снижение производства топочного мазута до 34 млн т (36,8 млн т в 2022 г.).

Прогноз прямо указывает на рост потребления всех нефтепродуктов в России, что ставит перед отраслью задачу поиска эффективных, надежных и безопасных инструментов транспортировки и хранения данной продукции. Для хранения нефти и нефтепродуктов в отечественной практике широко применяются различные резервуары: металлические, железобетонные, из синтетических материалов и даже льдогрунтовые. В статье представлены наиболее распространенные конструкции резервуаров. Не рассматриваются, например, железобетонные подземные резервуары, поскольку они фактически повсеместно выведены из эксплуатации.

Различные виды потерь при хранении и транспортировке нефтепродуктов

В России и за рубежом для хранения нефтепродуктов наиболее часто применяются стальные резервуары следующих типов: вертикальные цилиндрические со стационарной конической или сферической крышей вместимостью до 20 тыс. м³ (при хранении легковоспламеняющейся жидкости) и до 50 тыс. м³ (при хранении горючей жидкости); резервуары вертикальные цилиндрические со стационарной крышей и плавающим понтоном вместимостью до 50 тыс. м³; вертикальные цилиндрические с плавающей крышей вместимостью до 120 тыс. м³ (в том числе с алюминиевыми крышами [6]); горизонтальные; а также сферические.

Некоторые группы резервуаров оборудованы системами защиты от потерь при испарении, а часть — нет.

Традиционно принято выделять следующие виды потерь: количественные, качественно-количественные и качественные.

Количественные потери. Они происходят в результате утечек, переливов, неполного слива транспортных емкостей и резервуаров. Эти потери становятся возможными при негерметичности стенок и днищ резервуаров, неисправности запорной арматуры и контрольно-измерительного оборудования, несоблюдении технологии проведения операций. К потерям данного типа следует отнести также налипание нефтепродуктов и образование пленки на стенках емкости, для стекания которой необходимо дополнительное время.

Качественно-количественные потери. Они происходят при испарении нефти и нефтепродуктов. В результате испарения из нефти теряются легкие углеводороды, являющиеся ценным сырьем для нефтеперерабатывающей промышленности. Потери легких фракций снижают качество нефтепродуктов. В наибольшей степени это относится к бензинам и дизельному топливу, в меньшей степени — к реактивному топливу. Темные нефтепродукты, в том числе масла, мазуты и смазки, практически не испаряются и, соответственно, по этой причине не теряют качества. В бензинах из-за потерь легких фракций понижаются октановое число и давление насыщенных паров, повышается температура начала кипения и выкипания различных фракций, что ухудшает пусковые качества бензинов, увеличивает расход горючего и износ двигателя.

Потери от испарения происходят при вытеснении паровоздушной смеси из газового пространства резервуаров и транспортных емкостей в атмосферу вследствие: заполнения резервуара нефтепродуктом (потери от «больших дыханий»); повышения давления в газовом пространстве выше давления срабатывания дыхательного клапана в результате суточных температурных колебаний газового пространства и поверхности нефтепродукта и (или) за счет изменения давления атмосферного воздуха («малые дыхания»); дополнительного насыщения газового пространства парами нефтепродукта после окончания выкачки («обратный выдох»);

вентиляции газового пространства при наличии двух отверстий и более в крыше или корпусе резервуара, расположенных на разных уровнях.

Качественные потери. Они возникают в результате смешения, загрязнения, обводнения, окисления нефтепродуктов. Ухудшение качества нефтепродукта в результате смешения происходит при последовательной перекачке по одному трубопроводу различных по свойствам нефтепродуктов, а также при заполнении емкостей, содержащих остатки нефтепродукта другого сорта. При этом возможен перевод части нефтепродукта в более низкий сорт, т.е. уменьшение его количества.

Основная доля потерь нефтепродуктов при транспортных и складских операциях (по различным оценкам экспертов — от 60 до 80 %) приходится на период хранения в резервуарах. Конкретные пути борьбы с потерями нефтепродуктов при их хранении в резервуарах товарно-сырьевых парков нефтеперерабатывающих заводов, нефтебаз, а также складов горючего потребителей этих продуктов различных промышленных, транспортных, сельскохозяйственных, прочих предприятий и организаций весьма разнообразны и выбираются в зависимости от причин, по которым возникают потери нефтепродуктов, и от характера этих потерь.

Организационно-технические мероприятия по снижению потерь

Для сокращения потерь от испарения при транспортировке и хранении применяют следующие методы.

1. Сокращение объема газового пространства резервуара. Из анализа механизма качественно-количественных потерь следует, что чем меньше объем газового пространства, тем меньше потери, в резервуаре без газового пространства теоретически потери от испарения должны отсутствовать полностью. Этот принцип конструктивно используется в резервуарах с плавающими крышами или понтонами, что позволяет сократить потери от «больших дыханий» и «обратного выдоха» на 70–75 % (при коэффициенте годовой оборачиваемости до 60 раз в год) и на 80–85 % (при коэффициенте годовой оборачиваемости свыше 60 раз в год). Сократить потери от «малых дыханий» можно на 70 % по сравнению с обычными резервуарами со щитовой кровлей.

2. Хранение под избыточным давлением. Если конструкция резервуара рассчитана на работу под избыточным давлением, то в таком резервуаре могут быть полностью ликвидированы потери от «малых дыханий» и частично от «больших дыханий». Однако, как показали расчеты, большие избыточные давления усложняют конструкцию и удорожают стоимость резервуаров. На оптимальную величину избыточного давления сильно влияют оборачиваемость резервуара, физико-химические свойства нефтепродукта и метеорологические условия.

3. Уменьшение амплитуды колебания температуры газового пространства. Для создания условий изотермического хранения нефтепродуктов или значительного уменьшения колебаний температур газового пространства и поверхности нефтепродукта применяют теплоизоляцию резервуаров, охлаждение их в летнее время водой и окраску в белый цвет, а также подземное хранение.

4. Улавливание паров нефтепродуктов, вытесняемых из емкости. Для этого применяют газоуравнительные обвязки, представляющие собой отдельные трубопроводы или систему трубопроводов, соединяющих газовые пространства резервуаров или транспортных емкостей. Использование газоуравнительной обвязки позволяет частично сократить потери от «больших дыханий». Эффективность сокращения потерь при использовании газовой обвязки зависит от коэффициента совпадения операций и выкачки. Ориентировочно можно считать, что потери сокращаются на величину, равную коэффициенту совпадения операций. Применение газгольдеров, включаемых в газоуравнительную обвязку резервуаров, позволяет значительно снизить потери и при малых коэффициентах совпадения операций.

Наиболее эффективными являются следующие организационные мероприятия:

для уменьшения потерь от «малых дыханий» в атмосферных резервуарах нефтепродукты необходимо хранить при максимальном заполнении резервуаров, так как в этом случае достигается наименьший объем газового пространства;

для сокращения потерь от «больших дыханий» необходимо максимально сократить внутрибазовые перекачки нефтепродукта из резервуара в резервуар; чем меньше промежуток времени между выкачкой и закачкой нефтепродукта в резервуар, тем меньше величина потерь от «больших дыханий»;

потери от «малых дыханий» прямо пропорциональны площади испарения, поэтому легкоиспаряющиеся нефтепродукты выгоднее хранить в резервуарах большого объема;

важное значение имеет техническое состояние резервуаров и дыхательной арматуры (регулярная проверка герметичности крыши резервуара и исправности клапанов может предотвратить потери от вентиляции газового пространства).

Применение средств защиты не снижает потери до нуля, и по этой причине общепринятым считается нормирование максимально допустимых потерь по так называемым естественным причинам. Для нормирования убыли нефтепродуктов по естественным причинам в России приняты и действуют следующие нормативные документы:

постановление Правительства РФ от 12.11.2002 № 814 «О порядке утверждения норм естественной убыли при хранении и транспортировке материально-производственных запасов»;

приказ Министерства энергетики РФ от 16.04.2018 № 280 «Об утверждении норм естественной убыли нефти при хранении»;

приказ Министерства энергетики РФ от 16.04.2018 № 281 «Об утверждении норм естественной убыли нефтепродуктов при хранении»;

приказ Министерства энергетики РФ № 1035, Министерства транспорта РФ № 412 от 15.11.2018 «Об утверждении норм естественной убыли нефти и нефтепродуктов при перевозке железнодорожным, автомобильным, водным видами транспорта и в смешанном железнодорожно-водном сообщении».

Для понимания потенциальных потерь светлых нефтепродуктов в процессе внутреннего потребления в России попробуем оценить значения нормированных потерь по методике и примерам, приведенным в методических рекомендациях Минэнерго России [7].

Если рассматривать потери с площади поверхности, то наибольший процент достигается для бензинов, дизельного топлива, авиационного керосина, в то же время потери мазута и других темных нефтепродуктов незначительны и ими можно пренебречь. Поскольку авиационный керосин имеет специальные условия хранения и транспортировки, в статье этот продукт не рассматривается. Таким образом, на территории России в 2018 г. потребление бензина составило 35,2 млн т (разница между производством и экспортом, импорт не учитывается ввиду незначительного объема), а дизельного топлива — 23,4 млн т.

Внутреннее потребление рассматривается в качестве основного источника потерь, поскольку экспортные потоки, как правило, проходят через крупные перевалочные нефтебазы и терминалы, резервуары хранения которых оснащены системами снижения потерь от испарения. В то время как основной объем внутреннего потребления проходит через резервуары малой емкости, которые до объема в 700 м³ не имеют, а от 1 тыс. до 5 тыс. м³ не всегда имеют средства защиты от испарения.

В настоящее время проблема борьбы с потерями при испарении нефтепродуктов с открытого зеркала при хранении стоит довольно остро для системы распределения и потребления нефтепродуктов в РФ. Развитие современной нефтехимической промышленности, повышение внутреннего спроса на нефтепродукты высокого качества приводят к тому, что потери от испарения могут составлять сотни миллионов рублей в год. Указанная проблема осложняется тем, что потери на одном резервуаре объемом до 5 тыс. м³ чаще всего имеют незначительные абсолютные значения, и собственник нефтебазы не заинтересован в том, чтобы реализовывать экономически не окупаемые методы борьбы с потерями.

Поскольку конкретные нормы потерь нефтепродуктов зависят от трех значимых факторов (категория нефтепродукта, климатический пояс размещения резервуара и применение средств защиты от испарения), проведем оценку потерь, варьируя данные кри-

терии. Результаты анализа нормативов естественной убыли нефтепродуктов в России приведены в табл. 1.

Для оценки общих потерь от испарения нефтепродуктов необходимо оценить долю потребления нефтепродукта в каждой из климатических зон. Примем, что объем потребления бензина пропорционален населению федеральных округов, попадающих в данные климатические зоны. Считая уровень потребления нефтепродуктов постоянным для населения РФ, можно оценить долю потребления, приходящуюся на каждый климатический пояс, результаты расчета приведены в табл. 1. Распределение субъектов России по климатическим поясам взято из рекомендаций [7], оценка населения в каждом из субъектов принята на 1 января 2019 г. по официальным данным Росстата (табл. 2).

Таблица 1

Продукт	Критерий оценки	Нормы потерь для климатических поясов		
		III пояс	II пояс	I пояс
Бензины	Оценка снизу ¹	0,229	0,189	0,112
	Оценка сверху ²	0,582	0,506	0,425
Дизельное топливо	Средняя оценка ³	0,037	0,031	0,026

¹ Оценка снизу представляет собой среднее арифметическое между нормой убыли нефтепродукта в резервуаре объемом 5 тыс. м³ в весенне-летний и осенне-зимний периоды.

² Оценка сверху представляет собой среднее арифметическое между нормой убыли нефтепродуктов в резервуаре до 100 м³ в весенне-летний и осенне-зимний периоды.

³ Средняя оценка представляет собой среднее арифметическое между нормами убыли в разных климатических поясах.

Таблица 2

Климатический пояс	Доля населения РФ, %	Потребление нефтепродуктов, млн т	
		Бензин	Дизельное топливо
I — холодный макроклиматический район	4,7	1,65	1,10
II — холодный умеренный макроклиматический район	77,4	27,25	18,11
III — теплый умеренный макроклиматический район	17,9	6,30	4,19

Важнейшим фактором, определяющим потенциальный ущерб от потерь при хранении, является нахождение среднего значения периода хранения нефтепродуктов при потреблении данной продукции населением РФ.

После анализа открытых источников обнаружилось, что такой срок может значительно различаться для регионов России. Например, в ОАО «Саханефтегазбыт» (Якутия) средний срок хранения нефтепродуктов на нефтебазах лежит в диапазоне от 152 до 220

дней, достигая 365 дней для страхового запаса [8]. В то же время для регионов без значимого сезонного фактора снабжения это значение находится в диапазоне от 5 до 7 дней (например, для нефтебаз Амурской обл. в 2008 г. этот срок равнялся 5,7 дней) [9].

Для дальнейшего анализа принимаем средний срок хранения нефтепродуктов — 7 дней, в этом случае потенциальный ущерб от испарения нефтепродуктов за год для внутреннего потребления России представлен в табл. 3.

щиты от потерь в результате испарения. Ввиду этого сложилась практика, когда резервуары малой емкости фактически никак не защищаются от потерь по причине испарения.

Такое положение в рамках всей экономики России наносит значительный ущерб, достигающий сотен миллионов рублей, поэтому целесообразно рассмотреть варианты более дешевых решений по защите от испарения для таких конструкций со стоимостью реализации, сопоставимой с масштабом

Таблица 3 потенциальных потерь.

Продукт	Критерий оценки	Потери для климатических поясов, т			Всего, т	Итого, млн руб.
		III	II	I		
Бензины	Оценка снизу	336,63	1201,73	43,12	1581,48	68,22
	Оценка сверху	855,54	3217,32	163,63	4236,49	182,75
Дизельное топливо	Средняя оценка	36,17	131,00	6,67	173,84	7,92

Результаты анализа показывают, что годовые потери нефтепродуктов от испарения в резервуарах малого объема для РФ имеют значительный размер и могут достигать 4,5 тыс. т. Общий ущерб от потерь в результате испарения нефтепродуктов в системе внутреннего потребления России достигает 190 млн руб. Данная оценка является приближением снизу, поскольку в расчетах не учитываются потери при транспортных операциях, а также потери в резервуарах, не предназначенных для длительного хранения и перевалки продукта, в которые продукт попадает при чрезвычайных ситуациях. Например, это резервуары сброса нефтепродуктов, дренажные резервуары, которые никогда не оборудуются системами снижения потерь.

Данный вид потерь распределяется по значительному числу резервуаров малого объема (в системе снабжения нефтепродуктами РФ действует около 1200 нефтебаз [10], а общее число резервуаров — 40 тыс.), для которых потери в год не превышают в наихудшем случае малого резервуара объемом до 100 м³, согласно методике [7], одной тонны продукта в год, т.е. максимальные потери при наихудших условиях не превышают 1 % объема хранимого продукта. Сопоставимые цифры потерь характерны и для других стран, например, в работе [11] приведены данные по потерям бензинов в Судане, где показано, что фактические потери в резервуарах без защитных устройств превышают нормируемые почти в 2 раза.

Выводы и предложения

Вышеперечисленные способы борьбы с потерями слишком затратны для малых резервуаров. Потенциальная экономия при снижении потерь продукта (стоимость одной тонны нефтепродукта на бирже лежит в диапазоне от 42 до 55 тыс. руб. в зависимости от вида нефтепродукта) не способна окупить установку и эксплуатацию существующих систем за-

щиты от потерь в результате испарения. Известны следующие подходы к реализации такой защиты: микросферы (микрошарики), пленки, гранулированное пеностекло.

Все указанные конструкции представляют собой способ покрытия свободной поверхности продукта в резервуаре и снижения испарения нефтепродукта с открытого зеркала.

Эксперименты по микрошарикам в США начались в 1956 г., но до сих пор не удалось реализовать коммерческое решение по защите поверхности нефтепродукта таким способом. Основная проблема — целостность покрытия может нарушаться при большой скорости заполнения или выкачки резервуара. Кроме того, микрошарики выносятся из резервуара вместе с потоком жидкости при ее выкачке из резервуара. Для предотвращения попадания микрошариков в трубопроводы и насосы в резервуарах устанавливаются специальные предохранительные устройства, а перекачка нефтепродукта проводится с малой скоростью, что приводит к простоям транспортных средств во время налива. В дополнение существует проблема налипания микрошариков на поверхность стенки резервуара. Применение микрошариков для нефтяных резервуаров подробно рассмотрено в [12], а для защиты от испарения открытых водоемов — в [13].

Проводились исследования по созданию защитных покрытий зеркала испарения эмульсиями из поверхностно-активных веществ, которые образуют устойчивые пленки, растекаясь по поверхности нефтепродукта. Исследования показали, что такими свойствами обладают фторсодержащие вещества, имеющие большие коэффициенты растекания. Покрытие из такой пленки снижает упругость паров под пленкой в 3–4 раза и сокращает потери от испарения до 75 %. Следует отметить, что не удалось добиться стабилизации толщины покрытия эмульсии и обеспечить стабильность работы данного покрытия в течение длительного периода. Для снижения потерь легких фракций нефти предложено использовать свободные жирные кислоты (англ. Free Fatty Acid, FFA), которые добавляются в нефть в небольшом количестве [14] для понижения давления насыщенных паров, но данная методика малоэффективна для нефтепродуктов.

Перспективным представляется применение гранулированного пеностекла. Данная методика известна достаточно давно и подробно рассмотрена в [15].

Гранулированное пеностекло является широко применяемым материалом в промышленности. Его производство широко налажено в рамках строительной отрасли России. Внедрение гранулированного пеностекла в качестве защитных покрытий зеркала испарения потенциально может повысить эффективность и безопасность эксплуатации конструкций резервуаров, снизить потери в процессе хранения в резервуарах малой емкости, при этом не влияет на технологический режим эксплуатации самих резервуаров. Эффективность применения гранулированного пеностекла подтверждена лабораторными исследованиями [15].

Считаем целесообразным рассматривать возможность реализации способа снижения площади открытого зеркала продукта в резервуаре, основанного на применении покрытий из гранулированного пеностекла, как перспективную технологию снижения потенциальных рисков потерь нефтепродуктов при их хранении.

Список литературы

1. Добыча нефтяного сырья. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/1209> (дата обращения: 22.01.2020).
2. Годовой отчет Роснефти за 2018 г. URL: https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/a_report_2018.pdf (дата обращения: 22.01.2020 г.).
3. Годовой отчет ПАО Транснефть за 2018 г. URL: <https://ar2018.transneft.ru/ru/strategic-report/situation-industry> (дата обращения: 22.01.2020).
4. Статистический сборник «ТЭК России — 2018». URL: <https://ac.gov.ru/archive/files/publication/a/22922.pdf> (дата обращения: 22.01.2020).
5. Прогноз социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2024 г. URL: https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/prognoz_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rf_na_period_do_2024_goda_.html (дата обращения: 22.01.2020).
6. Васильев Г.Г., Леонович И.А., Сальников А.П. Применение наземного лазерного сканирования для оценки напряженно-деформированного состояния алюминиевых крыш резервуаров// Безопасность труда в промышленности. — 2017. — № 10. — С. 11–17. DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-11-17
7. Методические рекомендации по применению норм естественной убыли нефти и нефтепродуктов при хранении и перевозке железнодорожным, автомобильным, водными видами транспорта и в смешанном железнодорожно-водном сообщении (утв. Минэнерго России 01.08.2019). URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72515772/> (дата обращения: 22.01.2020).
8. Постановление о наложении административного штрафа по делу № 02-32/13-14.31 об административном правонарушении. Управление Федеральной антимонопольной службы по Республике Саха (Якутия), 2014. URL: http://sakha.fas.gov.ru/sites/sakha.f.isfb.ru/files/solution/2014/02/20/p_o_s_t_a_n_o_v_l_e_n_i_e_2.docx (дата обращения: 22.01.2020).
9. Анализ и оценка состояния конкурентной среды рынка услуг по хранению нефтепродуктов в Амурской области. Управление Федеральной антимонопольной службы по Амурской области, 2010. URL: <http://amur.fas.gov.ru/analytic/9086> (дата обращения: 22.01.2020).
10. Нефтебазы России. URL: <http://citek.ru/en/uslugi-i-produkty/spravochniki/94-neftebazy-rossii> (дата обращения: 22.01.2020).
11. Abdelmajeed M.A., Onsa M.H., Rabah A.A. Management of evaporation losses of gasolines storage tanks// Sudan Engineering Society Journal. — 2009. — Vol. 55. — № 52. — P. 39–43.
12. Шацких Е.С., Левин С.Н., Писаревский В.М. Анализ современных методов борьбы с потерями нефти и нефтепродуктов// Труды Российского государственного университета нефти и газа имени И.М. Губкина. — 2018. — № 2 (291). — С. 49–59.
13. Assouline S., Narkis K., Or D. Evaporation from partially covered water surfaces// Water Resources Research. — 2010. — Vol. 46. — Iss. 10. — P. W10539. doi: 10.1029/2010WR009121
14. Development of a New Method for Reducing the Loss of Light Hydrocarbons at Breather Valve of Oil Tanks/ M.M. Farhan, M.M. Al-Jumialy, A.D. Al-Muhammadi, A.S. Ismail// Energy Procedia. — 2017. — Vol. 141. — P. 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.061>
15. Шацких Е.С., Левин С.Н., Писаревский В.М. Применение гранулированного пеностекла в качестве покрытия зеркала испарения нефтяных резервуаров// Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. — 2018. — № 4. — С. 17–21.

srgrp@gubkin.ru

Материал поступил в редакцию 30 января 2020 г.

«Bezopasnost Truda v Promyshlennosti»/ «Occupational Safety in Industry», 2020, № 5, pp. 87–93.
DOI: 10.24000/0409-2961-2020-5-87-93

Potential Risks of Oil Product Losses during Storage and Analysis of Ways for Reducing Them

G.G. Vasilyev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department Chairman, srgrp@gubkin.ru

I.A. Leonovich, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof.

S.N. Levin, Senior Lecture

V.M. Pisarevskiy, Dr. Sci. (Eng.), Prof.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

Abstract

Continuous improving safety and functioning efficiency of oil and gas industry in the Russian Federation is a fundamental task for all the participants in the processes of hydrocarbons production, transportation, processing and sales cycle. Russia is one of the world leaders in oil production, being in the top three producing

countries together with Saudi Arabia and the USA. For storage of oil and oil products at all stages of the hydrocarbon life cycle, in domestic practice the tanks of various design were widely used: metal, reinforced concrete, from synthetic materials, and even ice ground. Some groups of this list of tanks are equipped with the systems of protection against evaporation losses, some — not. Application of any means of protection against losses does not lead to their reduction to zero, therefore, in domestic and world practice, the mechanism of rationing the maximum allowable losses became widespread for the so-called natural reasons. The highest percentage of losses is typical for light oil products: gasoline, diesel fuel, aviation kerosene, while losses during storage of oils, fuel oil and other dark oil products are minimal, and usually neglected in the calculations. Since the aviation kerosene has specific storage and transportation conditions, this product is not considered in this article. The main losses during storage and transportation occur in the internal distribution of petroleum products as export flows normally are passing through the large oil depots and terminals with storage tanks equipped with the systems for reducing losses during evaporation. At the same time, the bulk of domestic consumption passes through the small capacity tanks that do not have evaporation protection (for the tanks up to 700 m³) and do not always have evaporation protection (from 1000 to 5000 m³). In this case, the damage to the Russian Federation reaches hundreds of millions of rubles per year, therefore, it is advisable to consider the options for cheaper solutions concerning evaporation protection for such structures, the cost of implementation of which is comparable to the scale of possible losses.

Key words: losses, petroleum products, storage of petroleum products, tank, tiny balloons, granulated foam glass.

References

1. Petroleum feedstock production. Available at: <https://minenergo.gov.ru/node/1209> (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
2. Rosneft Annual Report for 2018. Available at: https://www.rosneft.ru/upload/site1/document_file/a_report_2018.pdf (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
3. PAO Transneft Annual Report for 2018. Available at: <https://ar2018.transneft.ru/ru/strategic-report/situation-in-dustry> (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
4. Statistical digest «Russian Fuel and Energy Complex — 2018». Available at: <https://ac.gov.ru/archive/files/publication/a/22922.pdf> (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
5. Forecast of socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2024. Available at: [https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rf_na_period_do_2024_goda_.html](https://www.economy.gov.ru/material/directions/makroec/prognozy_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya/prognoz_socialno_ekonomicheskogo_razvitiya_rf_na_period_do_2024_goda_.html) (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
6. Vasilyev G.G., Leonovich I.A., Salmikov A.P. Use of Terrestrial Laser Scanning for Assessment of Tank Aluminum Roofs Stress-Strain State. *Bezopasnost Truda v Promyshlennosti = Occupational Safety in Industry*. 2017. № 10. pp. 11–17. (In Russ.). DOI: 10.24000/0409-2961-2017-10-11-17
7. Methodical recommendations for the application of the norms of natural loss of oil and oil products during storage and transportation by rail, road, water types of transport, and in the mixed rail-water communication (approved by the Ministry of Energy of Russia on August 01, 2019). Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/72515772/> (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
8. Resolution on the imposition of an administrative fine in case number 02-32/13-14.31 on the administrative offense. Department of the Federal Antimonopoly Service for the Republic of Sakha (Yakutia), 2014. Available at: http://sakha.fas.gov.ru/sites/sakha.f.isfb.ru/files/solution/2014/02/20/p_o_s_t_a_n_o_v_l_e_n_i_e_2.docx (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
9. Analysis and assessment of the competitive environment of the market for petroleum products storage services in the Amur Region. Administration Office of the Federal Antimonopoly Service in the Amur region, 2010. Available at: <http://amur.fas.gov.ru/analytic/9086> (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
10. Oil depots in Russia. Available at: <http://citek.ru/en/uslugi-i-produkty/spravochniki/94-neftebazy-rossii> (accessed: January 22, 2020). (In Russ.).
11. Abdelmajeed M.A., Onsa M.H., Rabah A.A. Management of evaporation losses of gasolines storage tanks. *Sudan Engineering Society Journal*. 2009. Vol. 55. № 52. pp. 39–43.
12. Shatskikh E.S., Levin S.N., Pisarevskiy V.M. Analysis of current methods to combat losses of oil and petroleum products. *Trudy Rossiyskogo gosudarstvennogo universiteta nefti i gaza imeni I.M. Gubkina = Proceedings of Gubkin Russian State University of Oil and Gas*. 2018. № 2 (291). pp. 49–59. (In Russ.).
13. Assouline S., Narkis K., Or D. Evaporation from partially covered water surfaces. *Water Resources Research*. 2010. Vol. 46. Iss. 10. pp. W10539. doi: 10.1029/2010WR009121
14. Farhan M.M., Al-Jumaily M.M., Al-Muhammadi A.D., Ismail A.S. Development of a New Method for Reducing the Loss of Light Hydrocarbons at Breather Valve of Oil Tanks. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 141. pp. 471–478. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.061>
15. Shatskikh E.S., Levin S.N., Pisarevskiy V.M. Application of Granulated Foam Glass as a Coating of the Evaporation Mirror of Oil Tanks. *Transport i khranenie nefteproduktov i uglevodorodnogo syrya = Transport and Storage of Oil Products and Hydrocarbons*. 2018. № 4. pp. 17–21.

Received January 30, 2020

ПАМЯТКА АВТОРУ

- Статья должна в обязательном порядке иметь реферат, ключевые слова и список литературы.
- Реферат к статье (в соответствии с требованиями международных баз данных) должен достаточно полно раскрывать ее содержание (но не быть калькой с русскоязычной аннотации), иметь объем в среднем 1800–2000 символов. Реферат должен быть переведен на английский язык.

ПОПОВ Петр Дмитриевич

Ветеран Приокского управления Ростехнадзора, Великой Отечественной войны, награжден двумя орденами «Знак Почета», медалями «За Победу в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.» и «За трудовую доблесть».



— Меня призвали в армию в конце 1944 г. и направили в Тамбовскую школу снайперов, — рассказывает П.Д. Попов. — Обучение длилось четыре месяца. По окончании снайперской школы в конце марта 1945 г. мы попали в Германию в разгар Берлинской операции под командованием Георгия Жукова. Наша стрелковая дивизия располагалась под Берлином.

Мне было приказано охранять действующую часть. Несмотря на то что немецкая армия была в глубоком окружении, ее авиация периодически наносила удары по нашим позициям. Как-то молодым снайперам поручили освободить занятый противником многоэтажный дом. Одну половину его уже занимали наши воины, а из второй фашистов пришлось выпроваживать с боем. Нам приказали: стрелять только в военных.

Восьмое мая 1945 г. — день объявления капитуляции Германии — я запомнил на всю жизнь. Люди ликовали, вокруг стреляло все, что могло стрелять: палили из орудий, автоматов и пистолетов!

После войны я продолжил службу в Псковской военно-десантной дивизии. Прослужил семь лет и решил пойти учиться. Еще во время службы в Пскове поступил в Торжокский техникум при Правительстве СССР, который готовил кадры для Госрезерва. Горжусь, что попал в эту систему. Там царили военный порядок и дисциплина. В сфере Госрезерва проработал до 1963 г. В разное время занимал должности заместителя начальника цеха на предприятии, заместителя начальника по качеству, начальника зернохранилища на станции Тихонова пустынь, директора Калужского мелькомбината. В эти же годы закончил Московский пищевой институт.

В 1960-е годы мне поступило предложение, от которого по тем временам нельзя было отказаться, — перейти на партийную работу. После окончания

трехмесячных курсов в высшей партийной школе в Ленинграде меня назначили заместителем заведующего организационным отделом Калужского обкома партии. Затем возглавлял Ферзиковскую партийную организацию. Отстающий сельский район, занимавший по своим основным показателям последние места, за 13 лет удалось вывести на пятое место. Там я оставил частицу своей души.

В конце 1980-х годов появляется новая служба — экологическая. Я занимался подбором кадров для вновь созданного комитета по охране природы. Был объявлен набор, среди критериев оценки кандидатов: специальные знания из области химии, биологии, зоотехнологии, профильное естественно-научное или медицинское образование. Желаящих оказалось много — до 10 чел. на одно место. Стояла основная задача — не допустить ошибку при отборе. Таким образом, мы укомплектовали аппарат областного комитета, городских и районных комитетов по охране природы, организовали работу по повышению квалификации работников. Специалисты прошли соответствующую подготовку и получили удостоверения

о присвоении звания «эколог». Сложилась система повышения квалификации специалистов через постоянно действующие курсы при госкомитете и по линии учебы Госкомэкологии Российской Федерации. Также проводили организаторскую работу в связи с переводом специалистов госкомитета в статус государственных служащих.

Среди тех, кто попал в тот первый набор, и по сей день работают: Василий Георгиевич Челенко — руководитель Приокского управления Ростехнадзора, Дмитрий Эдуардович Харитонов, Раиса Михайловна Климова — сотрудники управления. За сорок

лет трудовой деятельности я поработал со многими коллективами. Считаю, что экологическая служба закалила меня, поставила на ноги. И по сей день вспоминаю эту интересную и живую работу.

В 2020 г. Петру Дмитриевичу исполнится 93 года. Он живет активной полноценной жизнью, разводит пчел и ухаживает за своим огородом, расположенным в уютном местечке Ферзиковского р-на Калужской обл., занимается гимнастикой, закаливанием, принимает активное участие в деятельности вете-



ранской организации Приокского управления Ростехнадзора. А в декабре 2019 г. приезжал в Тулу на торжественное мероприятие, посвященное 300-летию учреждения горного и промышленного надзора России, и получил награду — юбилейную медаль Федеральной службы по экологическому, техно-

гическому и атомному надзору «300 лет» из рук ее руководителя А.В. Алёшина.

Материал подготовила Надежда Дьякова, зам. начальника отдела предоставления государственных услуг, планирования и отчетности Приокского управления Ростехнадзора

КАДЕЕВ Каюм Мустафаевич

Начальник Управления Татарского округа Госгортехнадзора СССР в отставке, выпускник Московского института нефтехимической и газовой промышленности им. И.М. Губкина.



▲ Первая в нефтяной промышленности СССР ультразвуковая диагностика трубы после сварки

Родился К.М. Кадеев 28 октября 1928 г. в с. Кризовере Лямбирского р-на Мордовской АССР. «Трудиться я начал в 13 лет после ухода отца на фронт на лесопильном заводе, где изготавливали ящики

для снарядов», — вспоминает Каюм Мустафаевич. Только в 1946 г. продолжил обучение в школе, после окончания которой работал слесарем, затем бригадиром тракторной базы в Баку Азербайджанской ССР. В 1950–1954 гг. трудился помощником бурильщика 6-го разряда в конторе бурения «Татнефть» (г. Лениногорск, Татарская АССР), в 1954–1963 гг. — начальником Ново-Письмянской РГТИ Татарской государственной горнотехнической инспекции (г. Лениногорск). С 1963 по 1965 г. занимал должности второго, затем первого секретаря Лениногорского ГК КПСС, а с 1965 по 1989 г. возглавлял Управление Татарского округа Госгортехнадзора СССР. В 1989 г. после ухода на пенсию преподавал в Казанском химико-технологическом университете. Награжден медалью «За доблестный труд в Великой Отечественной войне 1941–1945 гг.».



НЕЙДЕРОВ Николай Лукоянович

Участковый инспектор отдела по надзору в химической промышленности Управления Татарского округа Госгортехнадзора СССР в отставке.

Родился Н.Л. Нейдеров 14 декабря 1931 г. в с. Лесные Моркваши Верхне-Услонского р-на Татарской ССР в семье крестьян. Во время Великой Отечественной войны в 10-летнем возрасте работал в колхозе «Путь к Коммунизму», как и его мать, другие женщины и подростки. «Трудились дружно, сообща. Никого не надо было упрашивать, все дети понимали — надо. Можно сказать, что меня, как и других детей, воспитала война», — вспоминает Николай Лукоянович. После окончания в 1956 г. Казанского химико-тех-

нологического института по специальности «инженер-механик машин и оборудования химических заводов» Н.Л. Нейдеров работал в Красноуральске (Свердловская обл.) на оборонном предприятии п/я 4, где прошел путь от мастера цеха до главного механика завода. В 1960 г. вернулся в Казань, где работал мастером по ремонту оборудования в цехе отлива основы на Казанском химическом заводе им. В. Куйбышева. С 1974 г. трудился инспектором химического надзора в Управлении Татарского округа Госгортехнадзора СССР. С 1999 г. Николай Лукоянович находится на заслуженном отдыхе в связи с достижением пенсионного возраста.

Ветераны Приволжского управления Ростехнадзора День Победы в Великой Отечественной войне считают самым главным праздником. Желают всем крепкого здоровья, мирного неба и призывают всех без исключения помнить Подвиг нашего народа в этой войне.

Материал подготовила Алена Стряпчиева, руководитель пресс-службы Приволжского управления Ростехнадзора



КРАСНЫХ Борис Адольфович *(к 70-летию со дня рождения)*

30 апреля 2020 г. исполнилось 70 лет Борису Адольфовичу Красных, кандидату технических наук, заместителю руководителя Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в отставке, председателю Научно-технического совета Ростехнадзора, действительному государственному советнику Российской Федерации 2-го класса, лауреату премии Правительства Российской Федерации в области образования.

Трудовая деятельность Бориса Адольфовича началась в 1966 г. с ученика электрослесаря в шахтоуправлении № 160 комбината «Донбассантрацит». По окончании в 1972 г. Днепропетровского горного института им. Артёма он трудился на шахтах «Северная» и «Центральная» объединения «Воркутауголь», занимая должности от сменного мастера участка до заместителя главного инженера шахты.

С 1981 г. Б.А. Красных — в системе Госгортехнадзора, Ростехнадзора, где он прошел путь от участкового горнотехнического инспектора Управления Печорского округа до заместителя руководителя Ростехнадзора. Период его работы в центральном аппарате пришелся на годы перестройки, изменения структуры государства, экономической и хозяйственной политики, а также совершенствования государственной системы управления промышленной безопасностью.

Борис Адольфович активно участвовал в совершенствовании надзорной деятельности Федерального горного и промышленного надзора России, в разработке и реализации Федерального закона «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», нормативно-правовых актов — основы регулирования комплекса вопросов промышленной безопасности. Он организовывал и курировал деятельность Научно-технического управления Госгортехнадзора России, управлений по надзору в горной, металлургической и угольной промышленности, по общепромышленному надзору Ростехнадзора. Много внимания Б.А. Красных уделяет работе в Межгосударственном совете по промышленной безопасности стран — участников СНГ.

Глубокие знания и большой опыт работы на государственной службе Бориса Адольфовича востребованы и в настоящее время, он успешно направляет работу Научно-технического совета Ростехнадзора и Комитета Торгово-промышленной палаты Российской Федерации по промышленной безопасности. Его широкое поле деятельности всегда вызывает уважение сотрудников, он пользуется авторитетом у руководителей министерств и ведомств, поднадзорных компаний, предприятий и организаций.

За многолетний и добросовестный труд Б.А. Красных награжден орденами Почета, Кемеровской обл. «За доблестный шахтерский труд» II степени, МАНЭБ «Безопасность. Честь. Слава», РАЕН «За пользу Отечеству» им. В.Н. Татищева, медалями «В память 850-летия Москвы», «В память 1000-летия Казани», юбилейными медалями Ростехнадзора, МЧС России «За содружество во имя спасения», серебряной медалью «За вклад в развитие уголовно-исполнительной системы России», знаками «Шахтерская слава» трех степеней, «Лучший государственный инспектор Госгортехнадзора России», знаками отличия «За заслуги в уничтожении химического оружия» II и III степени и «За вклад в химическое разоружение».

Коллективы Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, Союза ветеранов Ростехнадзора, группы компаний «Промышленная безопасность», редакционный совет, редколлегия и редакция журнала «Безопасность труда в промышленности» сердечно поздравляют Бориса Адольфовича с 70-летием, желают крепкого здоровья, счастья и дальнейшей успешной деятельности в сфере промышленной безопасности.

ПОДПИСКА на I полугодие и на 2020 г.



Учредители

Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору (Ростехнадзор)



Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности» (ЗАО НТЦ ПБ)

Журнал «Безопасность труда в промышленности»

Ежемесячный научно-производственный журнал.

Издается с 1932 г. Публикуются материалы по экологической, энергетической, промышленной безопасности и безопасности в строительстве; методические и правовые документы; приказы и распоряжения в сфере деятельности Ростехнадзора; интервью, репортажи и консультации по актуальным научным и производственным проблемам.

Журнал входит в перечень ведущих рецензируемых журналов ВАК Минобрнауки России, рекомендуемых для публикации научных результатов кандидатских и докторских диссертаций.

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) и в международные базы данных: Scopus, Chemical Abstracts Service (CAS), EBSCO Publishing. Всем опубликованным научным статьям присваивается индекс DOI.



Реклама

В ЗАО НТЦ ПБ (самовывоз). Цена, руб.	На 1 мес	На 2 мес	На 4 мес	На 6 мес	На год
	1500	3000	6000	9000	16 200
Доставка почтой Цена, руб.	На 1 мес	На 2 мес	На 4 мес	На 6 мес	На год
	1950	3900	7800	11 700	21 060

Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору

Дается информация о состоянии и причинах аварийности и травматизма на опасных производственных объектах в различных отраслях промышленности и о текущей деятельности надзорного органа в области промышленной, экологической, энергетической безопасности и безопасности в строительстве.

В ЗАО НТЦ ПБ (самовывоз). Цена, руб.	На 1 мес	На 2 мес	На 4 мес	На 6 мес	На год
	—	600	1200	1800	3564
Доставка почтой Цена, руб.	На 1 мес	На 2 мес	На 4 мес	На 6 мес	На год
	—	858	1716	2574	4633,2

Вниманию рекламодателей!

Отдел рекламы



+7 (495) 620-47-54.
E-mail: ignatova@safety.ru

ЭЛЕКТРОННАЯ ПОДПИСКА

Оформление электронной подписки на журнал «Безопасность труда в промышленности» на 2020 год — **12 000 руб.**

Информационный бюллетень Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору на 2020 год — **6012 руб.**

Приобрести электронные издания и получить консультацию можно в отделе распространения, отправив заявку по электронной почте



E-mail: ornd@safety.ru.
Тел/факс +7 (495) 620-47-53

105082, Москва, Переведеновский пер., д. 13, стр. 14, а/я 38

Сертифицированный программный комплекс



Сертификаты соответствия в системе
ГОСТ Р: № RA.RU.AB86.H00946, RA.RU.AB86.H00947,
RA.RU.AB86.H00948 от 25.08.2016

Актуальнее. Быстрее. Удобнее.

Является средством информационного обеспечения лицензионных требований к организациям, занимающимся экспертизой обоснований безопасности ОПО, деклараций промышленной безопасности и проектной документации. Предназначено для программного обеспечения расчетов прогноза и показателей риска аварий на ОПО.

Реклама

Позволяет рассчитать:

- последствия аварий с выбросом опасных веществ из емкостного оборудования и трубопроводов;
- показатели риска аварии на территории опасного производственного объекта (ОПО);
- показатели пожарного риска на территории ОПО и в зданиях, сооружениях и строениях.

Формирует к печати:

- результаты вычислений в форматах MS Word, MS Excel;
- зоны поражения, поля потенциального риска, поля частот превышения избыточного давления и импульса на плане ОПО;
- F-N диаграммы социального риска, F-P и F-I диаграммы риска разрушения зданий.

Используется при разработке:

- деклараций пожарной и промышленной безопасности;
- СТУ на объекты строительства и реконструкции;
- обоснований безопасности ОПО;
- обоснований взрывоустойчивости зданий.

Сертифицирован на соответствие:

- федеральным нормам и правилам и 11 руководствам по безопасности, утвержденным Ростехнадзором в 2015 году;
- 2-м методикам МЧС России;
- 6-ти ГОСТ Р и отраслевым стандартам*.

* с полным списком вы можете ознакомиться на официальном сайте www.toxi.ru

Теперь соответствует Руководству по безопасности «Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах магистрального транспорта газа» (утв. приказом Ростехнадзора от 26.12.2018 № 647)