



Государственный научно-исследовательский институт
горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской
защиты «Респиратор» Министерства по делам гражданской
обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий
стихийных бедствий Донецкой Народной Республики

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 2(57)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2020

УДК 614.8"363"+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 2(57). – 116 с.

Изложены результаты исследований в области защиты населения и территорий в чрезвычайных ситуациях, техногенной безопасности, предупреждения и тушения пожаров на шахтах, создания горноспасательной техники, спасения людей при подземных авариях. Журнал внесен в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (приказ МОН ДНР № 1134 от 01.11.2016).

Публикуемые материалы рассчитаны на ученых и специалистов, занимающихся вопросами предупреждения чрезвычайных ситуаций, борьбы с их последствиями, преподавателей, аспирантов и студентов вузов, работников различных отраслей промышленности.

Учредитель и издатель – Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики.

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	С.П. Греков – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	Ю.Ф. Булгаков
д-р техн. наук	С.П. Высоцкий
д-р техн. наук	А.Ф. Долженков
д-р техн. наук	С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь)
д-р техн. наук	В.Г. Игишев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	В.А. Канин
д-р техн. наук	А.П. Ковалев
д-р техн. наук	В.П. Коптиков (Российская Федерация)
д-р техн. наук	К.Н. Лабинский
д-р техн. наук	В.В. Мамаев
д-р техн. наук	Ф.В. Недопекин
д-р техн. наук	Д.Ю. Палеев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	Г.П. Стариков
канд. техн. наук	В.С. Харьковский (Республика Казахстан)
д-р хим. наук	В.В. Шаповалов

Журнал включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (договор № 157-03/2016 от 23.03.2016).

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 3 от 07.05.2020).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

Свидетельство о регистрации печатной версии журнала ААА № 000086 от 14.12.2016.

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”

Scientific-technical journal

No. 2(57)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2020

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2020. – No. 2(57). – 116 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergencies, of anthropogenic safety, prevention and fighting the fires at the mines, creation of the mine-rescue equipment, life-saving the people by underground accidents are expounded. The journal is included in the list of reviewed scientific publications in which the basic scientific results of dissertations for degrees of doctor and candidate of sciences should be published (order of the Ministry of Education and Science of the Donetsk People's Republic no. 1134 from 01.11.2016).

The materials being published are intended for scientists and specialists concerning with the problems of prevention of emergencies, fighting their consequences, lecturers, postgraduate students and students of institutes of higher education, workers of various industries.

Founder and publisher – The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters.

Editorial board:

Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Grekov – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	Yu.F. Bulgakov
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Vysotskiy
Dr. Sci. (Tech.)	A.F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Igishev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	V.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A.P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	V.P. Koptikov (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	V.V. Mamayev
Dr. Sci. (Tech.)	F.V. Nedopekin
Dr. Sci. (Tech.)	D.Yu. Paleyev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
Cand. Sci. (Tech.)	V.S. Kharkovskiy (Republic of Kazakhstan)
Dr. Sci. (Chem.)	V.V. Shapovalov

The journal is included in the database of the "Russian Science Citation Index" (РИИЦ) (contract no. 157-03/2016 from 23.03.2016).

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 3 from 07.05.2020).

Registered by the Ministry of Information of the Donetsk People's Republic.

Registration certificate of the printing version of the journal AAA no. 000086 from 14.12.2016.

Registration certificate of the network publication AAA no. 000121 from 20.04.2017.

СОДЕРЖАНИЕ***I. Пожарная и промышленная
безопасность***

**Агеев В.Г., Греков С.П.,
Симонов А.М., Всякий А.А.**
Возникновение эндогенных пожаров
на шахтах ДНР: их обнаружение
и профилактика 7

**Коляда А.Ю., Дикенштейн И.Ф.,
Буряк Д.С.**
Параметры порошкового облака при
срабатывании ручных забрасываемых
средств пожаротушения 16

**Пeftибай Г.И., Галухин Н.А.,
Зинченко Н.Г., Еремин А.В.**
Получение и подача водного раствора
пенообразователя на большие
расстояния 27

***II. Безопасность в чрезвычайных
ситуациях***

**Мамаев В.В., Симонов А.М.,
Агарков Ал.В.**
Способ дистанционного отбора
и анализа проб шахтного воздуха 36

Орликова В.П.
Физико-химические свойства угля при
его внезапных выбросах 48

Козлитин А.А., Лебедева В.В.
Параметры хроматографического
обнаружения бензина и керосина
во фрагментах горевших материалов 57

**Козлитин А.А., Лебедева В.В.,
Непочатых И.Н.**
Методика обнаружения инициаторов
горения во фрагментах горевших
материалов 67

TABLE OF CONTENTS***I. Fire and industrial safety***

**Ageyev V.G., Grekov S.P.,
Simonov A.M., Vsyakiy A.A.**
Spontaneous mine fires outbreaks in mines
of the Donetsk People's Republic: their
detection and fire precaution 7

**Kolyada A.Y., Dikenshteyn I.F.,
Buryak D.S.**
Parameters of a powder cloud during
activation of handheld throwable fire-
extinguishing means 16

**Peftibay G.I., Galukhin N.A.,
Zinchenko N.G., Yeryomin A.V.**
Generation and delivery of an aqueous
solution of foaming agent at large distances 27

II. Safety in emergencies

**Mamayev V.V., Simonov A.M.,
Agarkov Al.V.**
Method of remote collection and analysis
of mine air samples 36

Orlikova V.P.
Physicochemical properties of coal
during its sudden outbursts 48

Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.
Parameters of benzine and kerosene
chromatographic detection in fragments
of burnt materials 57

**Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.,
Nepochatykh I.N.**
Methodology of detection of accelerants
in fragments of burnt materials 67

**III. Охрана труда
и экологическая безопасность**

**Капустин В.Б., Долженков А.Ф.,
Мороз Т.О.**

Анализ нормативной базы ДНР
по гражданской обороне

74

Высоцкий С.П., Печенога А.А.
Совершенствование
обратноосмотического обессоливания
воды

82

**Зинченко И.Н., Пашковский О.П.,
Волынец В.В.**

Установившийся процесс горения
на породном отвале

90

**Ковалев А.П., Якимишина В.В.,
Сапоненко О.А.**

Надежность защитных
коммутационных аппаратов

96

Иваненко А.Ф., Мухин П.Е.
Комплексный подход к обеспечению
безопасного функционирования
опасных производственных объектов

107

Требования к оформлению статьи

115

**III. Labor protection
and environmental safety**

**Kapustin V.B., Dolzhenkov A.F.,
Moroz T.O.**

Analysis of the Donetsk People's Republic
regulatory framework in the field of civil
defence

Vysotskiy S.P., Pechenoga A.A.

Improvement of reverse osmosis for water
desalination

**Zinchenko I.N., Pashkovskiy O.P.,
Volynets V.V.**

Steady-state combustion process at a waste
rock pile

**Kovalyov A.P., Yakimshina V.V.,
Saponenko O.A.**

Reliability of protective switching devices

Ivanenko A.F., Mukhin P.Ye.

Comprehensive approach to the safe
operation of hazardous industrial objects

Requirements of execution of an article

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 622.822.2

Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, директор; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.ru;

Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: avrstla@mail.ru;

Александр Александрович Всякий, науч. сотр.; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81*

ВОЗНИКНОВЕНИЕ ЭНДОГЕННЫХ ПОЖАРОВ НА ШАХТАХ ДНР: ИХ ОБНАРУЖЕНИЕ И ПРОФИЛАКТИКА

Цель. Анализ горно-геологических условий разработки выемочных полей шахт ДНР, характеристик схем проветривания добычных участков, мест и условий возникновения эндогенных пожаров для разработки технологии текущего прогноза самовозгорания угля.

Методы. Ретроспективный анализ мест и условий возникновения эндогенных пожаров на шахтах Донбасса за многолетний период, а также условий отработки угольных пластов шахт ДНР.

Результаты. Систематизированы происшедшие на шахтах Донбасса эндогенные пожары за 15-летний период по местам и условиям возникновения, схемам отработки выемочных участков. Организация локального прогноза эндогенной пожароопасности по каждому выемочному участку для предотвращения эндогенных пожаров.

Научная новизна. Показано, что независимо от степени склонности углей к самовозгоранию возможно возникновение эндогенных пожаров в зонах горно-геологических нарушений, в выработанных пространствах лав и полостях внезапных выбросов за счет того, что профилактические мероприятия проводят не в полной мере, не учитывают горно-геологических и горно-технических условий отработки пластов, что свидетельствует о необходимости организации текущего локального прогноза эндогенной пожароопасности на каждом выемочном участке.

Практическая ценность. Внедрение текущего локального прогноза эндогенных пожаров в поле действующих очистных забоев позволит существенно снизить возможность возникновения эндогенных пожаров.

Ключевые слова: самовозгорание; склонность; геологическое нарушение; пожар; вентиляция; выемочный участок.

Постановка проблемы. Для предотвращения возникновения эндогенных пожаров на шахтах ДНР, разрабатывающих пласты угля, склонные к самовозгоранию, организован контроль состояния воздуха горных выработок согласно действующим Правилам безопасности в угольных шахтах, который осуществляется не реже двух раз в месяц. Места контроля воздуха регламентированы действующим Уставом по организации и ведению горноспасательных работ. Для обеспечения эффективности проводимых мероприятий необходим достоверный прогноз эндогенной пожароопасности.

Анализ последних исследований. Изучение аварийности на шахтах Донбасса за многолетний период [1] показало, что проводимые на шахтах профилактические мероприятия по предупреждению самовозгорания угля во

многих случаях в полной мере не обеспечивают необходимой пожарной безопасности, что происходит в результате нерационального применения таких мер. Их вид и количество определяют на основе прогноза эндогенной пожарной опасности, устанавливаемой для каждого шахтопласта перед началом подготовительных работ. В то же время известно, что пожароопасность изменяется зонально даже в пределах одного выемочного участка. Соответственно в отдельных зонах шахтного поля применение мероприятий нецелесообразно, а в других – они должны быть усилены.

Исследования НИИГД «Респиратор» показали, что необходим локальный прогноз эндогенной пожароопасности выемочных участков. Он предложен в работе [2] и основан на использовании, с одной стороны, совокупности физико-химических свойств угля, а с другой – комплекса природных и горно-технических факторов. Указанные свойства и факторы определяют возможность возникновения эндогенных пожаров в выработках (установление в ходе ведения горных работ потенциально опасных по самовозгоранию угля зон в пределах выемочных участков). Это позволяет реализовать научно обоснованные технические решения проблемы предупреждения эндогенных пожаров.

Согласно разработанному алгоритму первоначально устанавливают склонность угля выемочного участка к самовозгоранию по методике определения склонности углей к самовозгоранию, при этом если уголь оказывается склонным к самовозгоранию, то выявляют места возможных его потерь при отработке конкретного выемочного участка. После чего толщину фактических потерь угля сравнивают с критической толщиной, рассчитанной для данного шахтопласта по одной из известных в литературе формул.

Если в результате сравнения оказывается, что фактическая толщина больше критической, то переходят к математическому моделированию процесса самонагрева угольного скопления в выработанном пространстве выемочного участка. Такое моделирование позволяет учесть влияние различных физико-химических и теплофизических параметров на формирование теплового поля и развитие окислительных процессов в выработанном пространстве конкретного участка.

Предложенный метод прогноза эндогенной пожароопасности угля позволяет определить с достаточной степенью достоверности наиболее вероятные места возникновения пожаров при отработке выемочных участков.

Цель настоящей работы – анализ горно-геологических условий разработки выемочных полей шахт ДНР, характеристик схем проветривания добычных участков, мест и условий возникновения эндогенных пожаров для разработки технологии текущего локального прогноза самовозгорания угля.

Результаты исследований. В настоящее время в Донецкой Народной Республике работают 19 шахт, добывающих 7 млн т угля в год. Количество добычных участков 39. Разрабатывают пологие пласты угля с углом наклона до 16° , не склонные к самовозгоранию ($l_1^B, l_2, l_3, l_4, l_6, l_7, l_8', h_8, h_{10}, h_{10}^B, h_{11}, k_3, k_3^H, k_4, k_5, k_8^H$) и склонные к самовозгоранию (m_3, l_1, h_6^1). Толщина пластов от

0,9 до 1,7 м. Все пласты угрожаемые и опасные по внезапным выбросам угля и газа. На многих полях выемочных участков есть зоны прогнозируемых и непрогнозируемых геологических нарушений. Из них встречаются зоны с углем, склонным к самовозгоранию, например, на шахтах «Холодная балка» (пласт h_{10}^B), «Комсомолец Донбасса» (пласты l_3, l_4, l_7).

На шахтах ДНР применены следующие схемы проветривания:

- 1В (возвратноточная с выходом вентиляционной струи на выработанное пространство и последовательным разбавлением источников метановыделения) – используют на 22 участках;
- 2В (с частичным разбавлением источников метановыделения) – используют на трех участках;
- 3В (с полным обособленным источником разбавления метана по источникам метановыделения) – используют на восьми участках;
- 1М (проветривание на массив угля) и 1К (комбинированные) – используют на одном и трех участках соответственно.

Длины лав выемочных участков около 150 м (три лавы), остальные до 220...260 м, со скоростью подвигания линии очистного забоя от 8...10 м в месяц (четыре лавы), другие до 40 м в месяц.

Приведенная характеристика шахт – основная при разработке технологии обнаружения признаков самовозгорания угля и методики текущего его контроля.

Для исследования условий, причин и возможных мест возникновения эндогенных пожаров на шахтах ДНР обратимся к статистике пожаров на одних и тех же пластах за длительный предыдущий период, когда угольную промышленность Донбасса уже сокращали (реструктуризировали), но еще добывали 70...120 млн т угля в год.

В ходе анализа 100 случаев возникновения эндогенных пожаров в зависимости от условий образования угольных скоплений было выявлено, что эти скопления образовывались при выемке угля не на полную мощность пласта, в том числе при подработке и наработке спутников пласта, оставлении угля в зонах геологических нарушений, особенно при резких колебаниях в толщине и угле залегания вынимаемого пласта, а также в зонах разрывных нарушений. В некоторых случаях благоприятные условия для самовозгорания угля создавались также в барьерных и охранных целиках.

Рассмотрим распределение эндогенных пожаров по годам в зависимости от условий образования пожароопасных скоплений угля (табл. 1).

За рассматриваемый период при выемке угля не на полную толщину наблюдалась устойчивая тенденция снижения количества эндогенных пожаров, что объяснялось широким применением мощных угледобывающих комплексов.

В среднем каждый третий пожар связан с оставлением угля в зонах геологических нарушений. В бортовых частях барьерных и охранных целиков угля происходило 15,1 % эндогенных пожаров, а при прочих и неустановленных условиях 18,5 %.

Таблица 1

Условия образования пожароопасных скоплений угля

Условие	Количество пожаров по годам				Всего пожаров	Доля, %
	1991... 1995	1996... 2000	2001... 2005	2006... 2010		
Выемка угля не на полную толщину пласта	42	24	16	5	87	38,7
Оставление угля в зонах геологических нарушений	27	18	10	7	62	27,7
Оставление угля в барьерных и охранных целиках	22	7	1	4	34	15,1
Прочие и неустановленные условия	17	12	9	3	41	18,5
Всего пожаров	108	61	36	19	224	100

Ежегодно 20...30 % эндогенных пожаров регистрировали на пластах, не отнесенных к склонным к самовозгоранию. В этих случаях очаги самонагрева угля возникали в зонах геологических нарушений, раздавленных целиках, в скоплениях угля, орошенного пролитыми смазочными жидкостями.

На антрацитовых шахтах единичные очаги самонагрева и возгорания отмечены в скоплениях угля после внезапных выбросов, в деформированных целиках и в зонах геологических нарушений.

Динамика эндогенных пожаров в зависимости от места их возникновения представлена в табл. 2.

Значительное количество эндогенных пожаров (55,8 %) происходило в выработанных пространствах действующих и отработанных очистных забоев, при этом большая их часть (29,9 %) – в выработанном пространстве действующих забоев, 14,3 % – в отработанных изолированных и 11,6 % – в отработанных неизолированных участках.

Из данных, приведенных в табл. 2, также следует, что каждый четвертый пожар происходит за крепью капитальных и участковых горных выработок. Часто эндогенные пожары возникают в тупиковых слабо проветриваемых горных выработках.

Обращает на себя внимание большое количество эндогенных пожаров в зонах геологических нарушений (30,3 %). Это происходит в выработанных пространствах и за крепью горных выработок, что обусловлено в основном

повышенной активностью угля в самовозгорании в этих условиях, сложностью его полной выемки, а также недостаточной эффективностью профилактических мероприятий.

Таблица 2

Места возникновения эндогенных пожаров

Место возникновения пожара	Количество пожаров по годам				Всего пожаров	Доля, %
	1991... 1995	1996... 2000	2001... 2005	2006... 2010		
Выработанное пространство:	63	31	19	12	125	55,8
• действующих очистных забоев	31	17	12	7	67	29,9
• отработанных изолированных забоев	17	7	5	3	32	14,3
• отработанных неизолированных забоев	15	7	2	2	26	11,6
• в том числе в зонах геологических нарушений	18	11	5	5	39	17,4
Капитальные и участковые подготовительные выработки:	32	14	9	1	56	25,0
• горизонтальные	10	8	5	1	24	10,7
• наклонные	9	3	1	–	13	5,8
• тупиковые	13	3	3	–	19	8,5
• в том числе в зонах геологических нарушений	14	9	5	1	29	12,9
Охранные целики	3	6	6	4	19	8,5
Прочие места	10	10	2	2	24	10,7
Всего пожаров	108	61	36	19	224	100

Более половины эндогенных пожаров (55,5 %) происходило из-за некачественной изоляции выработанных пространств действующих и отработанных добычных участков (табл. 3).

Необходимо отметить, что для отработанных добычных участков, где произошло 35,3 % самовозгораний, вопросы обеспечения эффективности и надежности применяемых технологий предупреждения самонагревания и самовозгорания угля, а также контроля состояния угольных скоплений решены не в достаточной степени. Около четверти (24,3 %) пожаров обусловлены невыполнением или несвоевременным принятием мер по

предупреждению эндогенных пожаров. Причины возникновения значительной части (20,2 %) пожаров не установлены, такая же ситуация характерна для причин оставления пожароопасных скоплений угля при ведении горных работ.

Таблица 3

Причины возникновения эндогенных пожаров

Причина	Количество пожаров по годам				Всего пожаров	Доля, %
	1991... 1995	1996... 2000	2001... 2005	2006... 2010		
Некачественная изоляция выработанного пространства действующего очистного забоя	39	15	12	4	70	31,8
Несвоевременная изоляция отработанного участка	14	7	4	2	27	11,6
Некачественная изоляция отработанного участка	22	19	6	6	53	23,7
Невыполнение профилактических мероприятий в зонах геологических нарушений	16	7	4	2	29	12,7
Прочие причины	17	13	10	5	45	20,2
Всего пожаров	108	61	36	19	224	100

Приведенная характеристика пластов шахт ДНР и ретроспективный анализ возникших на этих пластах эндогенных пожаров позволяют заключить:

- на шести пластах шахт ДНР (l_4 , l_6 , l_8^1 , l_{10}^B , h_8 , h_6^1), на которых в предыдущий период времени случалось самовозгорание угля, очистные работы в настоящее время продолжают;

- из 19 шахт ДНР только на двух (им. А.А. Скочинского, пласт h_6^1 и им. А.Ф. Засядько, пласты l_4 , m_3) в настоящее время угли определены как склонные к самовозгоранию. На остальных пластах, хотя они, по данным НИИГД «Респиратор», в настоящее время не склонны к эндогенным пожарам, в предыдущий период пожары были (шахта «Октябрьская», пласт h_8 , неполная выемка угля, им. В.Р. Менжинского, пласт l_6 , в монтажной камере, шахта «Новгородовская», пласт l_1 , оставленный уголь, и шахта «Северная», пласт l_8^1 , геологическое нарушение);

- в не склонных к самовозгоранию углях остальных шахт имеются геологические нарушения разрабатываемых пластов, что чревато возникновением эндогенных пожаров.

Таким образом, в ДНР на 19 шахтах, разрабатывающих уголь в 39 лавах, только пять очистных забоев (три на шахте им. А.А. Скочинского и два на

шахте им. А.Ф. Засядько) – склонны к самовозгоранию. На четырех пластах (l_{10}^B , h_8 , l_6 и l_8^1) имелись пожары ранее, в связи с чем их нельзя считать полностью безопасными по этому признаку. Остальные пласты (l_1^B , l_2^1 , l_7 , h_7 , l_{10}^1 , h_{10}^B , h_{11} , k_3 , k_3^H , k_4^1 , k_5 , k_8^H) отнесены к не склонным, однако по геологическим данным на многих из них имеются геологические нарушения, что может привести к эндогенным пожарам.

Исходя из вышеизложенного целесообразно для предварительного анализа пожарной обстановки на каждой шахте иметь схему возможного образования пожароопасных потерь угля независимо от категории пожароопасности, представленную на рисунке.



Образование пожароопасных потерь угля

Возможность потерь угля в пределах выемочного участка определяют на основании изучения условий и причин возникновения пожаров на разрабатываемых шахтой пластах в предыдущий период времени. По данным геолого-маркшейдерской документации, выявляют зоны (места) возможного сосредоточения оставленного угля в выработанном пространстве по технологическим причинам. Анализ условий возникновения эндогенных пожаров на шахтах Донецкого бассейна позволяет отнести к пожароопасным потерям следующие:

- потери угля в невынимаемой части угольных пластов, когда оставляют пачки угля, в целиках технологического назначения или при наличии геологических нарушений;
- потери при выемке пластов с весьма неустойчивыми породами кровли;
- скопления угля в полостях выбросов;
- пропластки угля в кровле разрабатываемого пласта на расстоянии до четырехкратной его толщины.

Далее, при происшедших потерях угля отбирают их пробы из мест образования или в непосредственной близости от них и в лабораторных условиях определяют физико-химические и механические параметры, устанавливают склонность к самовозгоранию.

Изучают фильтрационные процессы в местах скопления угля. Рассчитывают утечки воздуха в них по программам вентиляции с учетом степени обрушаемости пород кровли, порядка отработки угольного пласта и скорости подвигания линии очистного забоя.

Исследуют тепловые процессы в скоплениях угля – условия накопления теплоты, зависящие от скопления угля, его теплофизических характеристик и рассеивания утечками воздуха, теплопроводностью в окружающие породы. Рассчитывают возможные температуры в скоплении угля, сравнивают с критическими и делают заключение о возможном переходе самонагревания угля в самовозгорание.

На основании исследований принимают меры по предупреждению самовозгорания угля в его скоплениях.

Анализ мест и условий, возникших за 15-летний период аварий на шахтах Донбасса, и условий разработки угольных пластов в настоящее время на всех 19 шахтах Республики позволяет резюмировать:

- • в настоящее время в границах ДНР эксплуатируют 20 угольных пластов, из них 14 пластов разрабатывают впервые и 6 вынимали ранее. Все пласты угрожаемые либо опасные по внезапным выбросам. На всех ранее разрабатываемых пластах происходили пожары от самовозгорания угля, хотя часть из них не была склонна к самовозгоранию;

- • подвергшиеся анализу пласты k_5 , l_1^1 , l_7 , l_8^1 , h_8 , h_{10}^B , разрабатываемые в настоящее время, сложного строения с пропластками глинистого сланца от 0,2 до 1,2 м, имеют в пределах шахтного поля геологические нарушения;

- • следует полагать, что на большинстве выемочных участков могут, по техническим причинам, создаваться условия для оставления невынутого угля.

Выводы. Таким образом, с целью недопущения самовозгорания углей на шахтах ДНР необходимо по каждому выемочному участку делать текущий локальный прогноз эндогенной пожароопасности, заключающийся в анализе горно-геологических условий выемочного поля, который основан на выявлении в пределах участка зон возможного скопления и оставления угля, анализе его проб, исследовании тепловых процессов и на основании этого выдавать заключение о принятии мер предупреждения самовозгорания угля.

Список литературы / References

1. Агеев, В.Г. Эндогенная пожароопасность на различных этапах становления шахт Донбасса / В.Г. Агеев, П.С. Пашковский, С.П. Греков // Донецк, 2018. – 147 с.

Ageyev, V.G., Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P. *Endogennaya pozharoopasnost' na razlichnykh etapakh stanovleniya shakht Donbassa* [Spontaneous fire hazard at the various stages of the development of the Donets Basin mines]. Donetsk, 2018, 147 p.

2. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 791 с.

Pashkovskiy, P.S. *Endogennyye pozhary v ugol'nykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ. (Donetsk branch), 2013, 792 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 27.02.2020

*Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior research scientist; e-mail: niigd@mail.ru;
Aleksandr Mikhaylovich Simonov, head of department; e-mail: avrstla@mail.ru;
Aleksandr Aleksandrovich Vsyakiy, scientific associate; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-81*

SPONTANEOUS MINE FIRES OUTBREAKS IN MINES OF THE DONETSK PEOPLE'S REPUBLIC: THEIR DETECTION AND FIRE PRECAUTION

Purpose. Analysis of mining-and-geological conditions of mining the mining extracted areas of the DPR mines, characteristics of the ventilation schemes of production units, places and conditions of the outbreaks of spontaneous mine fires for the development of technology for current prediction of the coal spontaneous combustion.

Methods. Retrospective analysis of places and conditions of the outbreaks of spontaneous mine fires at the Donets Basin mines for the period of many years, as well as of conditions of the extraction of coal seams of the DPR mines.

Results. The spontaneous mine fires occurred at the Donets Basin mines for the period of past 15 years have been systemized according to the places and conditions of the outbreak and to the layouts of extraction of working areas. Organization of the local prediction of spontaneous fire hazard of every single working area for prevention of spontaneous mine fire.

Scientific novelty. It has been shown that regardless of the degree of coal liability to spontaneous combustion, the outbreak of spontaneous mine fires is possible in the zones of mining-and-geological disturbances, in the mined-out wastes of longwall faces and spaces of sudden coal outbursts because the prevention measures are not carried out to the full extent and do not make allowance for mining-and-geological and mining conditions of the seam extraction which attests to the necessity of organizing and conducting the current local prediction of the spontaneous fire hazard at every working area.

Practical value. The implementation of the current local prediction of the spontaneous fires in the field of the active mining faces will make it possible to reduce considerably the possibility of the outbreak of spontaneous fires.

Keywords: *spontaneous combustion; liability; geological disturbance; fire; ventilation; working area.*

УДК 614.842.611

Андрей Юрьевич Коляда, нач. отд.; e-mail: kolyada1980@mail.ru;

Игорь Феликсович Дикенштейн, науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru;

Дмитрий Сергеевич Буряк, науч. сотр.; e-mail: buryak_ds@rambler.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-41*

ПАРАМЕТРЫ ПОРОШКОВОГО ОБЛАКА ПРИ СРАБАТЫВАНИИ РУЧНЫХ ЗАБРАСЫВАЕМЫХ СРЕДСТВ ПОЖАРОТУШЕНИЯ

Цель. Построить математическую модель образования порошкового облака и на ее основе определить параметры ручных порошковых средств пожаротушения для эффективного тушения пожаров в зданиях и сооружениях.

Методика. Аналитические исследования и математические расчеты параметров забрасываемого огнетушителя типа гранаты, начиненного порошковыми огнетушащими составами.

Результаты. Получена зависимость скорости разлета частиц газопорошкового облака от радиуса разлета и начального давления, на основании которой можно определить радиус защитной зоны, массу огнетушащего порошка, давление, необходимый запас газа и требуемое количество забрасываемых огнетушителей. Также получены аналитические зависимости для расчета минимально необходимого количества порошковых огнетушащих составов в одном забрасываемом огнетушителе с зарядом взрывчатых веществ и количества огнетушителей для ликвидации пожаров класса А и В.

Научная новизна. Построена математическая модель эволюции порошкового облака, расширяющегося под воздействием сжатого газа или заряда взрывчатых веществ.

Практическая значимость. Результаты исследования позволяют создать новые, а также повысить эффективность пожаротушения существующих ручных порошковых средств, которые доставляют огнетушащие средства непосредственно в очаг пожара и предотвращают действие негативных факторов, таких как высокая температура, сильная задымленность, обвал конструкций.

Ключевые слова: *порошковое облако; радиус разлета; огнетушащие концентрации; коэффициент сопротивления; ручные порошковые средства пожаротушения.*

Постановка проблемы. Применяемая в настоящее время подразделениями ДПС МЧС ДНР пожарная техника преимущественно рассчитана на прямое участие человека в процессе тушения пожара, что предполагает доступ к очагу горения. Однако в ряде случаев при тушении пожаров в труднодоступных местах, например в подвальных и полуподвальных помещениях, не имеющих выходных проемов, спасателям приходится сталкиваться с действием опасных факторов пожара: высокой температурой, сильной задымленностью, теплоизлучением, отсутствием подходов к очагу пожара.

Между тем при тушении пожаров в зданиях и сооружениях часто возникают ситуации, при которых пожарным необходимо быстро сбить пламя вручную, а использование имеющихся штатных огнетушителей затруднено.

Этих недостатков лишены дистанционные средства тушения – огнетушители типа гранат, снарядов, ракет, забрасываемых в очаг пожара с безопасного для человека расстояния вручную (для огнетушителей типа гранаты) либо с помощью специальных средств доставки, например стволовых установок пожаротушения.

Использование стволовых установок пожаротушения позволит доставлять методом метания в контейнерах огнетушащее вещество непосредственно в зону горения при тушении сложных пожаров на особо опасных объектах (зоны химического или радиационного заражения, территории минных заграждений, боевые арсеналы, склады боеприпасов и т.д.), обеспечивая при этом безопасность личного состава пожарных подразделений, занятых ликвидацией пожара.

Создание ручных импульсных средств пожаротушения обеспечит эффективное подавление очагов пожара внутри отдельных помещений за счет объемного распыления и создания облака разлета огнетушащего состава необходимого радиуса.

Разработки подобных средств ведут издавна. Вначале это были стеклянные колбы с водой, забрасываемые в очаг пожара. Затем – деревянные бочки с водой и запалом из черного пороха, которые вкатывали в охваченное пожаром помещение (вскоре воду заменили специальным составом из отходов мыловаренного производства, глины и воды). В 1846 г. инженер Кюн из Саксонии придумал коробку, начиненную смесью селитры и серы; при попадании в пламя смесь выделяла газ, гасивший горение. 7 февраля 1863 г. в США выдан первый патент на огнетушащую гранату.

Накоплен немалый опыт, в том числе и в НИИГД «Респиратор», разработки подобных огнетушителей, в которых в качестве огнетушащего вещества используют экологически чистые хладоны, огнетушащие порошки, а в качестве источника энергии для их распыления – сжатый газ, газогенерирующие составы, различные взрывчатые вещества (далее – ВВ). При этом должна быть обеспечена безопасность личного состава пожарных подразделений, использующих эти средства.

Однако разработку таких огнетушителей вели преимущественно путем опытно-конструкторских исследований. Теоретические адекватные разработки, позволяющие рассчитать требуемые для конструирования параметры – радиус разброса огнетушащего вещества, массу огнетушащего вещества, необходимые давление и запас газа для его распыления (в случае применения ВВ – массу конденсированного заряда ВВ), отсутствуют.

На рынке пожарной техники и оборудования появляются новые разработки ручных импульсных средств пожаротушения. Однако требуемых для их создания теоретических и экспериментальных исследований проводится недостаточно.

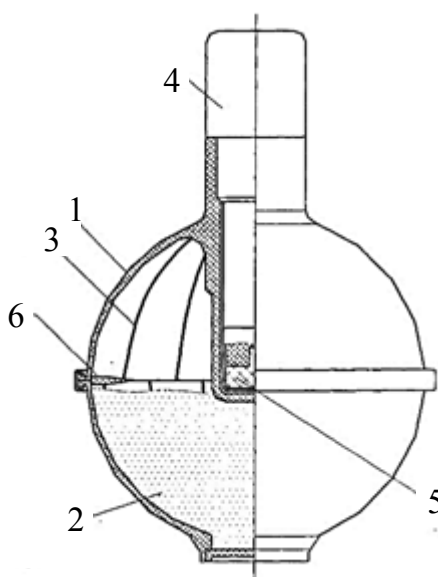
Анализ последних публикаций. В работе [1] доказано, что наиболее оптимальный вид огнетушащего вещества для таких огнетушителей –

порошковые огнетушащие составы, представлены формулы для расчета минимальной массы порошкового состава для прекращения горения на расчетной площади очага пожара (при условии распыления порошковых огнетушащих составов в зоне горения) и необходимого количества контейнеров с порошковыми огнетушащими составами. В эти формулы входят такие трудноопределимые или нерасчетные параметры: минимальное значение константы гетерогенной рекомбинации, при которой наблюдается тушение пламени; коэффициент диффузии частиц порошковых огнетушащих составов в газовой среде в зоне подготовки к горению; длина свободного пролета частиц порошка.

В работе [2] рассмотрено распространение аэрозольного облака в замкнутом пространстве и получены выражения для определения скорости торможения частицы аэрозоля, времени торможения и пути, пройденного частицей до полной остановки. Однако предложенная физико-математическая модель описывает распространение частиц аэрозоля с характерными размерами до 15 мкм.

Критический параметр, от которого зависит успех тушения, – концентрация частиц порошковых огнетушащих составов в воздухе. Концентрация частиц, в свою очередь, зависит от скорости образования аэрозольного облака, скорости осаждения частиц, диффузии, свойств частиц и окружающей среды, параметров внешних воздействий (тепловых конвективных потоков от очага горения и др.).

В работе [3] дано описание вновь разработанного устройства «Лотос» (см. рисунок).



Конструктивная схема устройства «Лотос»:

1 – корпус; 2 – огнетушащий состав; 3 – канавки на внутренней поверхности корпуса; 4 – запал; 5 – диспергируемый заряд; 6 – каркас

Устройство «Лотос» состоит из наполненного порошковым огнетушащим составом сферического корпуса из полиэтилена, имеющего ослабленные сечения в виде канавок на внутренней поверхности корпуса, и устройства приведения его в действие – запала с диспергирующим зарядом (см. таблицу) [3].

Технические параметры устройства «Лотос»

Параметр	Значение
Масса общая, кг	1,5
Масса порошкового огнетушащего состава, кг	1,3
Масса диспергирующего заряда, кг	0,005
Диаметр корпуса, мм	128
Длина корпуса, мм	240
Объем помещения при тушении пожара одним изделием, м ³	10

Таким образом, важная задача – прогнозирование эволюции порошкового облака, создаваемого при срабатывании устройства «Лотос» в пространстве аварийного помещения. Этому посвящена работа [4].

Цель статьи – построить математическую модель образования порошкового облака и обосновать на ее основе радиус защитной зоны, массу огнетушащего порошка, давление и необходимые запасы газа.

Изложение основного материала. Рассмотрим в общем виде случай сферического распыления порошка. Задача может быть поставлена следующим образом. Имеется сферическая оболочка, наполненная газопорошковой смесью, в центре которой внезапно повышается давление. При разрыве оболочки начинается разброс порошка. Необходимо определить максимальный радиус разброса.

Принимаем следующие допущения:

частицы порошка имеют сферическую форму и одинаковый диаметр $d_{п}$;

после торможения частиц в воздухе образуется порошковое облако радиусом r . Дальнейшее распространение частиц порошка в пространстве происходит за счет процесса конвективной диффузии.

Рассмотрим закономерности движения границы раздела:

$$\frac{d(m_n \vec{v})}{d\tau} = S_r(\tau)(P - P_a) + \vec{F}_c, \quad (1)$$

где m_n – масса газопорошковой смеси, кг;

\vec{v} – вектор скорости газопорошковой смеси, м/с;

τ – время, с;

$S_r = S_r(\tau)$ – текущая поверхность раздела, м²;

$P = P(\tau)$ – текущее давление внутри смеси, Па;

P_a – атмосферное давление, Па;

\vec{F}_c – суммарная сила сопротивления среды, Н.

Плотность ρ , кг/м³, газопорошковой смеси и давление P , Па, внутри смеси изменяются по известным закономерностям

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^3; P = P_0 \left(\frac{r_0}{r}\right)^{3k}, \quad (2)$$

где ρ_0 , P_0 – плотность газопорошковой смеси, кг/м³, и давление внутри оболочки, Па, в начальный момент времени;

r_0 – радиус начального объема смеси (радиус оболочки), м;

r – текущий радиус расширяющегося объема смеси, м;

k – показатель адиабаты для газопорошковой смеси.

Масса газопорошковой смеси:

$$m_n = m_T + \frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_0 \varepsilon_0, \quad (3)$$

где m_T – масса твердой фракции (частиц порошка), кг;

ε_0 – порозность смеси в оболочке в начальный момент времени.

Сила сопротивления движению одиночной частицы порошка f_c , Н, при турбулентном режиме ее обтекания:

$$f_c = \frac{1}{8} c_x \pi d_n^2 \rho v^2, \quad (4)$$

где $c_x = 0,42$ – соответствующий режиму обтекания коэффициент аэродинамического сопротивления для частицы;

v – текущая скорость частицы порошка, м/с.

Концентрация частиц c , кг/м³, порошка в сферической оболочке радиусом r :

$$c = m_T / \left(\frac{\pi d_n^3}{6} \rho_n \frac{4}{3} \pi r^3 \right), \quad (5)$$

где ρ_n – плотность материала частиц порошка, кг/м³.

Следовательно, во внешнем слое расширяющейся сферы толщиной $d_n/2$ количество частиц N :

$$N = m_T 4\pi r^2 \frac{d_{\Pi}}{2} / \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \frac{\pi d_{\Pi}^3}{6} \rho_{\Pi} \right) = 9m_T / (\pi \rho_{\Pi} d_{\Pi}^2 r). \quad (6)$$

Тогда суммарная сила сопротивления, действующая на поверхность расширяющейся сферы:

$$F_c = \sum_{n=1}^N f_c = \frac{9m_T}{\pi \rho_{\Pi} d_{\Pi}^2 r} \frac{1}{8} c_x \pi d_{\Pi}^2 \rho v^2 = \frac{9}{8} m_T c_x \rho v^2 / (\rho_{\Pi} r). \quad (7)$$

Зависимость коэффициента сопротивления c_x от концентрации частиц порошка можно не учитывать, поскольку при разлете по радиальным направлениям от центра частицы удаляются друг от друга и их взаимное влияние уменьшается.

С учетом выражений (2), (3) и (7) уравнение (1) принимает вид

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_0 \varepsilon_0 + m_T \right) v \right] = 4\pi r^2 \left[P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3k} - P_a \right] - \frac{9}{8} m_T c_x \rho v^2 / (\rho_{\Pi} r). \quad (8)$$

Дифференцируя, получаем

$$\left(\frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_0 \varepsilon_0 + m_T \right) \frac{dv}{dt} + \frac{9}{8} m_T c_x \rho v^2 / (\rho_{\Pi} r) = 4\pi r^2 \left[P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3k} - P_a \right].$$

Перейдем к дифференцированию по r :

$$\left(\frac{4}{3} \pi r_0^3 \rho_0 \varepsilon_0 + m_T \right) \frac{dv}{dr} \frac{dr}{dt} + \frac{9}{8} m_T c_x \rho v^2 / (\rho_{\Pi} r) = 4\pi r^2 \left[P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3k} - P_a \right],$$

и, учитывая, что $\frac{dr}{dt} = v$, получаем уравнение

$$\frac{dv^2}{dr} + \frac{av^2}{r} = br^2 \left[P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3k} - P_a \right], \quad (9)$$

где введены обозначения

$$a = \frac{27m_T c_x \rho}{4\rho_{\Pi} (4\pi r_0^3 \rho_0 \varepsilon_0 + 3m_T)}; \quad (10)$$

$$b = \frac{24\pi}{4\pi r_0^3 \rho_0 \varepsilon_0 + 3m_T}. \quad (11)$$

Таким образом, получено уравнение, описывающее зависимость скорости разлета частиц газопорошкового облака v от радиуса r разлета и начального давления P_0 .

Обозначим $v^2 = t$, получим

$$\frac{dt}{dr} + \frac{at}{r} = br^2 \left[P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3k} - P_a \right]. \quad (12)$$

Вводим замену переменной $t = xy$, после преобразований из выражения (12) получим два уравнения с разделяющимися переменными:

$$\frac{dy}{dr} + \frac{ay}{r} = 0; \quad (13)$$

$$\frac{dxy}{dr} = br^2 \left[P_0 \left(\frac{r_0}{r} \right)^{3k} - P_a \right]. \quad (14)$$

Интегрируя уравнение (13), получаем

$$y = r^{-a}. \quad (15)$$

Подставим уравнение (13) в (14) и, интегрируя, получим

$$x = br^{(3-3k+a)} r_0^{3k} r^{3-3k}. \quad (16)$$

Тогда

$$v^2 = \frac{bP_0 r_0^{3k} r^{3-3k}}{3-3k+a} + \frac{bP_a r^3}{3+a} + c. \quad (17)$$

Постоянную интегрирования c находим из начального условия ($r = r_0$; $v = v_0$)

$$c = v_0^2 r_0^a - \frac{bP_0 r_0^{3+a}}{3-3k+a} + \frac{bP_a r_0^{3+a}}{3+a}. \quad (18)$$

Окончательно находим

$$v^2 = \frac{bP_0 r_0^{3k} r^{3-3k}}{3-3k+a} + \frac{bP_a r^3}{3+a} + v_0^2 \left(\frac{r_0}{r} \right)^a - \frac{bP_0 r_0^3}{3-3k+a} \left(\frac{r_0}{r} \right)^a + \frac{bP_a r_0^3}{3+a} \left(\frac{r_0}{r} \right)^a. \quad (19)$$

Учитывая, что при максимальном значении радиуса разброса ($r = r_{\max}$) скорость фронта частиц $v = 0$, и пренебрегая малыми величинами, получаем

формулу, удобную для практических расчетов разлета частиц порошкового огнетушащего состава.

$$r_{\max} = r_0 \sqrt[3]{\frac{P_0}{P_a}}. \quad (20)$$

При выводе этой зависимости учитываем, что для высококонцентрированных воздушно-порошковых смесей показатель адиабаты $k \cong 1,0$.

В защищаемом объеме концентрация порошка должна быть не менее огнетушащей:

$$c \geq c_{\text{огн}} = m_{\Gamma} / \left(\frac{4}{3} \pi r_{\text{доп}}^3 \right). \quad (21)$$

Отсюда допустимый радиус разлета частиц

$$r_{\text{доп}} \cong \sqrt[3]{\frac{3m_{\Gamma}}{4\pi c_{\text{огн}}}}. \quad (22)$$

Сравнивая максимальный и допустимый радиусы, найдем оптимальное начальное давление, обеспечивающее требуемый разброс порошка:

$$P_{\text{опт}} = \frac{3m_{\Gamma} P_a}{4\pi c_{\text{огн}} r_0^3}. \quad (23)$$

Масса газа, необходимая для создания этого давления:

$$m_{\Gamma} = \frac{m_{\Gamma} P_a c_0 \rho}{3c_{\text{огн}} RT}, \quad (24)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·К);

ρ , T – плотность, кг/м³, и температура, К, газа.

Таким образом, зависимости (22) – (24) позволяют рассчитать все параметры забрасываемого огнетушителя типа гранаты: радиус защитной зоны, массу огнетушащего порошка m_{Γ} , давление и необходимый запас газа $P_{\text{опт}}$ и m_{Γ} .

Согласно [5] объем зоны горения $V_{\text{гор}}$ можно рассчитать по формуле

$$V_{\text{гор}} = F_{\text{гор}}^{3/2}, \quad (25)$$

где $F_{\text{гор}}$ – площадь пожара, м².

Тогда необходимое количество забрасываемых огнетушителей, требуемых для ликвидации пожара в аварийном помещении:

$$N_{\text{огн}} = \frac{F_{\text{гор}}^{3/2} c_{\text{огн}}}{m_{\text{T}}}, \quad (26)$$

где m_{T} – масса порошкового огнетушащего состава, содержащегося в одном огнетушителе типа гранаты, кг.

Если заменить сжатый воздух, используемый для вытеснения порошка, конденсированным ВВ, то зависимости для расчета примут следующий вид.

Минимальное количество порошкового огнетушащего состава, которое необходимо для тушения пожара класса А и В площадью $F_{\text{гор}}$:

$$m_{\text{T}}^R = \beta (\bar{d}_{\text{п}})^2 F_{\text{гор}}^{3/2} \rho_{\text{п}} / \left[2W \sqrt{\frac{m_z}{2(m_{\text{к}} + m_{\text{T}}) + m_z} \lambda_{\text{п}}} \right], \quad (27)$$

где β – минимальное значение константы гетерогенной рекомбинации, при котором наблюдается тушение пламени, с^{-1} ;

$\bar{d}_{\text{п}}$ – средний диаметр частиц порошка, мкм;

$\rho_{\text{п}}$ – плотность порошка, $\text{кг}/\text{м}^3$;

W – скорость детонации используемого ВВ, м/с;

m_z – масса заряда ВВ, кг;

$m_{\text{к}}$ – масса корпуса огнетушителя, кг;

m_{T} – масса порошкового огнетушащего состава в корпусе, кг;

$\lambda_{\text{п}}$ – длина свободного пробега частицы порошка, м.

Количество забрасываемых огнетушителей с ВВ, необходимых для тушения пожара в помещении:

$$N_{\text{огн}} = (F_{\text{гор}}^{3/2} c_{\text{огн}}) 2W \sqrt{\frac{m_z}{2(m_{\text{к}} + m_{\text{T}}) + m_z} \lambda_{\text{п}}} / \left[\beta (\bar{d}_{\text{п}})^2 F_{\text{гор}}^{3/2} \rho_{\text{п}} \right]. \quad (28)$$

Аналитические зависимости (19), (20) позволяют рассчитать минимально необходимое количество порошкового огнетушащего состава в одном забрасываемом огнетушителе с зарядом ВВ и количество огнетушителей для ликвидации пожаров класса А и В площадью горения $F_{\text{гор}}$.

Выводы. Результаты теоретических исследований подтверждают возможность дистанционного тушения пожаров в труднодоступных местах с помощью забрасываемых огнетушителей типа гранаты, начиненных порошковыми огнетушащими составами.

Аналитически выведены зависимости для расчета огнетушителей, приводимых в действие сжатым воздухом, и для огнетушителей с зарядом ВВ. Заброска огнетушителя непосредственно в очаг горения обеспечивает участие в процессе тушения практически 100 % порошкового состава. Полученные результаты позволяют создать новые ручные порошковые средства пожаротушения.

Список литературы / References

1. Ковалев, А.А. Разработка отдельных аспектов контейнерного метода тушения / А.А. Ковалев, А.Я. Калиновский, И.М. Хмиров // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – 2018. – Вып. 44. – С. 57 – 69.

Kovalyov, A.A., Kalinovskiy, A.Ya., Khmirov, I.M. *Razrabotka ot del'nykh aspektov konteynernogo metoda tusheniya* [Development of certain aspects of the container fire-extinguishing method]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti: sb. nauchn. tr.* [Problems of fire safety: collection of scientific papers]. 2018, issue 44, pp. 57 – 69.

2. Распространение аэрозольного облака в замкнутом пространстве / О.Б. Кудряшова, Н.В. Коровина, А.А. Павленко, В.А. Архипов, В.Д. Гольдин, Е.В. Муравлев // Инженерно-физический журнал. – 2015. – Т. 88, № 3. – С. 552 – 559.

Kudryashova, O.B., Korovina, N.V., Pavlenko, A.A., Arkhipov, V.A., Gol'din, V.D., Muravlev, Ye.V. *Rasprostraneniye aerazol'nogo oblaka v zamknutom prostranstve* [Spread of an aerosol cloud in the closed space]. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal – Engineering and Physics Journal*, 2015, vol. 88, no. 3, pp. 552 – 559.

3. Ручное импульсное средство пожаротушения «Лотос» / В.А. Попов, В.И. Гриценко, В.Г. Глушаков, А.А. Радюкевич, В.Е. Хомутский // Пожарная безопасность в строительстве. – 2010. – № 2. – С. 48 – 50.

Popov, V.A., Gritsenko, V.I., Glushakov, V.G., Radyukevich, A.A., Khomutskiy, V.Ye. *Ruchnoye impul'snoye sredstvo pozharotusheniya "ЛОТОС"* [The ЛОТОС handheld pulsed fire-extinguishing device]. *Pozharnaya bezopasnost' v stroitel'stve – Fire safety in construction work*, 2010, no. 2, pp. 48 – 50.

4. Влияние физико-химических свойств распыляемого вещества на эволюцию мелкодисперсного аэрозоля / О.Б. Кудряшова, Н.В. Коровина, А.А. Антонникова, Б.И. Воронцов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 3. – С. 114 – 117.

Kudryashova, O.B., Korovina, N.V., Antonnikova, A.A., Vorontsov, B.I. *Vliyaniye fiziko-khimicheskikh svoystv raspylyayemogo veshchestva na evolyutsiyu melkodispersnogo aerolya* [Influence of physicochemical properties of an evaporant on evolution of a fine-dispersed aerosol]. *Polzunkovskiy vestnik – Polzunov Bulletin*, 2013, no. 3, pp. 114 – 117.

5. Киселев, Я.С. Физические модели горения в системе предупреждения пожаров / Я.С. Киселев. – СПб., 2000. – 264 с.

Kiselyov, Ya.S. *Fizicheskiye modeli goreniya v sisteme preduprezhdeniya pozharov* [Physical models of combustion in the fire prevention system]. Saint Petersburg, 2000, 264 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 29.01.2020

Andrey Yuryevich Kolyada, head of department; e-mail: kolyada1980@mail.ru;

Igor Feliksovich Dikenshteyn, scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

Dmitry Sergeevich Buryak, scientific associate; e-mail: buryak_ds@rambler.ru

The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-41

PARAMETERS OF A POWDER CLOUD DURING ACTIVATION OF HANDHELD THROWABLE FIRE-EXTINGUISHING MEANS

Purpose. To develop a mathematical model of the powder cloud formation and on the basis of it to determine the parameters of the handheld throwable dry powder fire-extinguishing means for effective extinguishing the fires in buildings and constructions.

Methodology. Analytical investigations and mathematical calculations of the parameters of the throwable fire-extinguisher, grenade-type, filled with dry chemical fire-extinguishing compositions.

Results. The dependence of the projection velocity of the gas-powder cloud particles on the radius of projection and the initial pressure has been obtained, based on which protection zone radius, dry chemical powder mass, pressure, and necessary gas supply and required quantity of the throwable fire-extinguishers may be determined. The analytical dependences for calculation of the minimally necessary quantity of dry chemical powder compositions in one throwable fire-extinguisher with a charge of explosive substances and the quantity of the fire-extinguishers required for elimination of the class A and class B fires have been obtained as well.

Scientific novelty. The mathematical model of evolution of the dry powder cloud expanding due to the influence of the compressed gas or the charge of the explosive substances has been developed.

Practical value. The investigation results make it possible to create the new throwable fire-extinguishing means as well as to improve the fire-fighting effectiveness of the existing handheld dry powder means that deliver the fire-extinguishing means directly into the seat of fire and prevent the effect of negative factors such as high temperature, concentrated smoke, collapse of constructions.

Keywords: *dry powder cloud; radius of projection; fire-extinguishing concentrations; drag coefficient of resistance; handheld dry powder fire-extinguishing means.*

УДК [622.822.7 : 614.844.5]–519

Георгий Иванович Пфтибай, нач. отд.; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;

Николай Александрович Галухин, науч. сотр.; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru;

Никита Григорьевич Зинченко, инж. I кат.; e-mail: niigd.osmas-5@mail.ru;

Антон Витальевич Еремин, инж.-конструктор I кат.; e-mail: a.v.eremin18@gmail.com

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-36; 332-78-38

ПОЛУЧЕНИЕ И ПОДАЧА ВОДНОГО РАСТВОРА ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ НА БОЛЬШИЕ РАССТОЯНИЯ

Цель. Создание устройства для получения и подачи водного раствора пенообразователя на большие расстояния с вынесенным пеногенератором, расчет гидравлических потерь в линиях транспортирования воды и водного раствора пенообразователя, определение области применения.

Методы. Синтез конструктивной схемы с использованием трехмерного моделирования. Аналитические методы расчета потерь давления в рукавной линии и местных сопротивлений.

Результаты. Разработаны принципиальная гидравлическая схема и конструкция устройства для получения и подачи водного раствора пенообразователя на большие расстояния с вынесенным пеногенератором и насосной подачей пенообразователя. Выполнен расчет потерь давления по длине линии транспортирования воды и водного раствора пенообразователя, определена область применения.

Научная новизна. Показано, что доля потерь давления в рукавной линии длиной 1000 м и диаметром 51 мм составляет примерно 6,7 %, неснижаемая доля потерь давления на регуляторе расхода воды и пеногенераторе составляет примерно 84,2 % от общих потерь давления, а общие потери давления – около 0,95 МПа, что существенно превышает нижний предел нормативного давления в пожарно-оросительном трубопроводе. Из-за этого сужается область применения пенного пожаротушения на горные выработки, в которых давление в пожарно-оросительном трубопроводе меньше чем 0,95 МПа.

Практическая значимость. Определена область применения дистанционного тушения пожаров воздушно-механической пеной в труднодоступных местах горных выработок. Показано, что за счет сокращения рукавной линии невозможно существенно расширить область применения.

Ключевые слова: *рукавная линия; дозирование; пенообразователь; насосная подача; потери давления; пеногенератор.*

Постановка проблемы. Большая часть пожаров в угольных шахтах возникает в труднодоступных местах (эксплуатируемые или отработанные угольные лавы, закрепное пространство, выработки, пересекающие или пройденные по угольному пласту, погашаемые выработки), затрудняющих тушение активным способом. Для этого используют дистанционное тушение пожара воздушно-механической пеной, подаваемой по длинной рукавной линии. Недостаток такого способа пенного тушения пожара заключается в том, что эжекционный сеточный пеногенератор нагружается длинной рукавной линией, наполненной воздушно-механической пеной, которая создает противодействие на выходе пеногенератора, что обуславливает нестабильную работу эжектора, снижает кратность пены и дальность ее транспортирования.

Для устранения этого недостатка используют другую схему применения пеногенератора, когда пеногенератор приближают к месту пожара, а подачу водного раствора пенообразователя осуществляют по длинной рукавной линии. Поскольку пеногенератор приближен к месту пожара, то принудительная подача воздуха для продувки пакета сеток невозможна или затруднительна, поэтому используют сеточный пеногенератор эжекционного типа. Для устойчивой эжекции воздуха требуется создание на входе в сопло пеногенератора стабильного и высокого давления водного раствора пенообразователя около 0,6 МПа, что (без учета гидравлических потерь в линиях подготовки и транспортирования) совпадает с нижним пределом нормативного диапазона давлений в пожарно-оросительном трубопроводе 0,6...1,5 МПа. Это ставит вопрос о потерях давления по всей длине транспортирования водного раствора пенообразователя, сравнение его с располагаемым давлением в пожарно-оросительном трубопроводе и определение области применения пенного пожаротушения с приближенным к месту пожара пеногенератором.

Анализ последних исследований. В работах [1, 2] проведен анализ систем дозирования пенообразователя современных пожарных насосов, в том числе и систем с напорной подачей пенообразователя. Отмечается, что напорная (насосная) подача пенообразователя устраняет недостатки систем с безнапорной (эжекционной) и сбалансированной (с эластичным разделителем сред) системами подачи и позволяет подавать водно-пенный раствор на большие расстояния независимо от противодействия. В статье [3] анализируются перспективные пропорциональные дозаторы пенообразователя для создания его водного раствора и подачи в пеногенератор. Указывается, что высокие технические характеристики таких пожарно-технических устройств нивелируются более сложными техническими решениями и высокой ценой. В статье [4] рассмотрен процесс образования пены на примере пеногенератора ГПС-600. Получены зависимости кратности пены от ячейки сетки пеногенератора, описан процесс образования пузырька пены на сетке, установлен оптимальный размер ячейки сетки, равный 1,5 мм. В работе [5] обоснованы режимные и геометрические параметры эжекционного генератора, обеспечивающие наибольшую кратность пены.

Цель исследования – разработка устройства для получения и подачи водного раствора пенообразователя на большие расстояния, расчет гидравлических потерь в рукавной линии, определение области применения.

Материалы исследования. Гидравлическая схема устройства для получения и подачи водного раствора пенообразователя (далее – устройство) на большие расстояния (рис. 1) функционирует следующим образом. Подача воды из пожарно-оросительного трубопровода осуществляется через вентиль ВН1, сетчатый фильтр Ф, обратный клапан КО1, регулятор расхода воды РР на первый вход пеносмесителя ПС. На второй вход пеносмесителя ПС с помощью насоса Н с электроприводом М из бака Б через дроссель Др и обратный клапан

CO₂ подается пенообразователь в количестве 4...6 % от объемного расхода воды. Постоянный перепад давления на дросселе Др контролируется с помощью дифференциального манометра МН, а регулируется вентилем ВН2. Предохранительные клапаны КП1 и КП2 защищают от перегрузки давлением рукавную линию и насос Н соответственно. С выхода пеносмесителя ПС водный раствор пенообразователя по рукавной линии поступает на распылительное сопло пеногенератора ПГ.

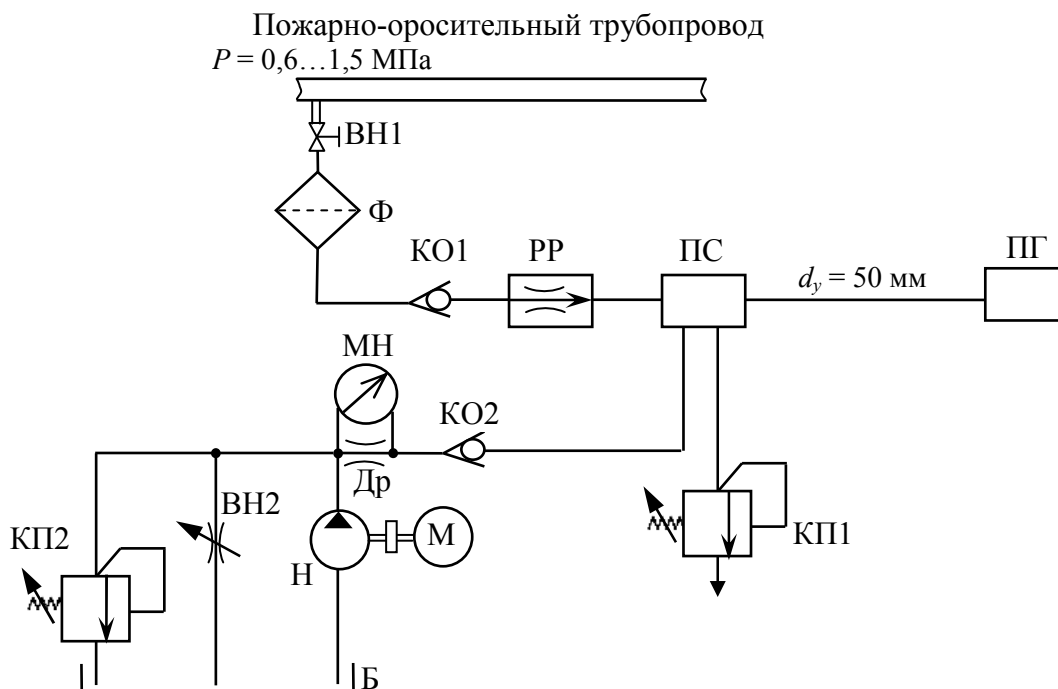


Рис. 1. Принципиальная гидравлическая схема устройства:
 Б – бак; ВН1, ВН2 – вентили; Др – дроссель; КО1, КО2 – обратные клапаны;
 КП1, КП2 – предохранительные клапаны; М – электропривод;
 МН – дифференциальный манометр; Н – насос; ПГ – пеногенератор;
 ПС – пеносмеситель; РР – регулятор расхода воды; Ф – сетчатый фильтр

Исходные данные для расчета устройства (рис. 2):

- давление на входе в сопло пеногенератора $P_{ПГ} = 0,5...0,6$ МПа;
- объемный расход водного раствора пенообразователя $Q = 10^{-3}$ м³/с;
- длина рукавной линии $l = 1000$ м;
- концентрация пенообразователя в водном растворе 4...6 %;
- давление воды в пожарно-оросительном трубопроводе

$$P_{ПОТ} = 0,6...1,5 \text{ МПа.}$$

В качестве вентиля ВН1, сетчатого фильтра Ф и обратного клапана КО1 выбираем стандартную нормализованную гидроаппаратуру с условным диаметром 20 мм.

Регулятор расхода РР – оригинальная разработка [6, 7], которая позволяет обеспечить стабильный расход воды независимо от давления в пожарноросительном трубопроводе и противодействия в длинной рукавной линии.

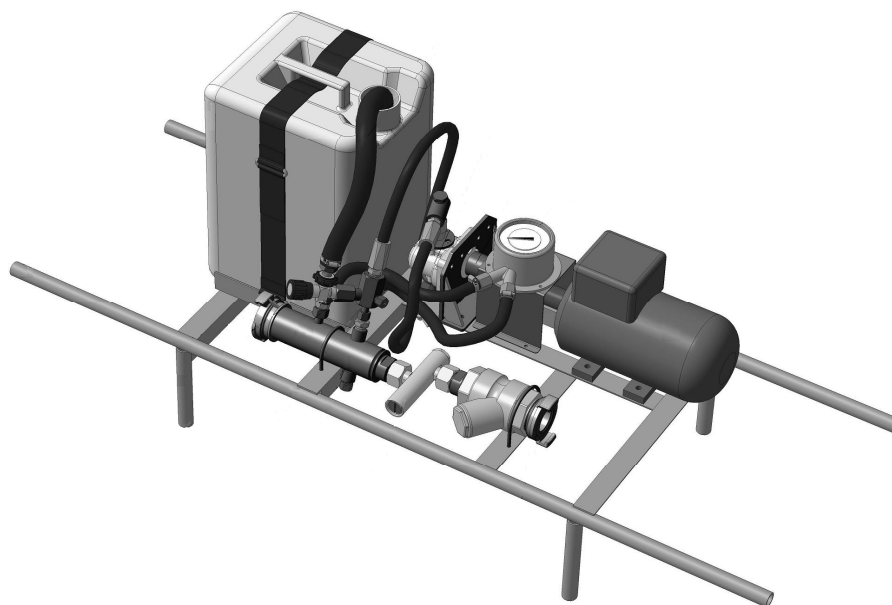


Рис. 2. Общий вид устройства

Запишем уравнение баланса потерь давления воды и водного раствора пенообразователя в устройстве:

$$P_{\text{ПОТ}} = \Delta P_{\text{ВН1}} + \Delta P_{\text{Ф}} + \Delta P_{\text{КО1}} + \Delta P_{\text{РР}} + \Delta P_{\text{МС}} + \Delta P_{\text{р}} + \Delta P_{\text{у}} + P_{\text{ПГ}},$$

где $\Delta P_{\text{ВН1}}$ – потери давления на вентиле ВН1, МПа;

$\Delta P_{\text{Ф}}$ – потери давления на сетчатом фильтре Ф, МПа;

$\Delta P_{\text{КО1}}$ – потери давления на обратном клапане КО1, МПа;

$\Delta P_{\text{РР}}$ – потери давления на регуляторе расхода РР, МПа;

$\Delta P_{\text{МС}}$ – потери давления в местных сопротивлениях, МПа;

$\Delta P_{\text{р}}$ – потери давления в рукавной линии, МПа;

$\Delta P_{\text{у}}$ – потери давления на преодоление уклона выработки, МПа.

Потери давления ΔP , МПа, в стандартной гидроаппаратуре найдем, используя параметр K_v , $\text{м}^{3,5} \cdot \text{кг}^{-0,5}$, называемый пропускной способностью, по формуле

$$\Delta P = 10^{-6} \left(\frac{Q}{K_v} \right)^2.$$

Так, для шарового клапана с условным диаметром 20 мм $K_v = 0,36 \cdot 10^{-4,5} \text{ м}^{3,5} \cdot \text{кг}^{-0,5}$ [8], а для сетчатого фильтра того же диаметра – $K_v = 0,26 \cdot 10^{-4,5} \text{ м}^{3,5} \cdot \text{кг}^{-0,5}$ [9]. Отсюда

$$\Delta P_{\text{ВН1}} = 0,0079 \text{ МПа}; \Delta P_{\Phi} = 0,0144 \text{ МПа}.$$

Потери давления в обратном пружинном муфтовом клапане с латунным золотником условным диаметром 20 мм находим непосредственно по графику, приведенному в работе [10], $\Delta P_{\text{КО1}} = 0,015 \text{ МПа}$.

Потери давления $\Delta P_{\text{РР}}$ – это перепад давления на регуляторе расхода воды, зависящий от требуемого расхода воды и конструктивной особенности регулятора [6, 7]. В регуляторе расхода воды принято усилие затяжки пружины, обеспечивающее $\Delta P_{\text{РР}} = 0,2 \text{ МПа}$. На пути следования потока воды встречаются многочисленные местные сопротивления, например, вход воды из пожарно-оросительного трубопровода в отводной патрубков, вход и выход в пеносмеситель, многочисленные изгибы рукавной линии по неровностям горной выработки и другие, которые трудно учесть аналитически. В таких случаях при работе устройства на длинную рукавную линию ($l = 1000 \text{ м}$) потери на местных сопротивлениях в гидравлике принимают равными примерно 5...10 % от потерь давления на рукавной линии, то есть $\Delta P_{\text{МС}} = (0,05...0,10) \Delta P_{\text{Р}}$.

Потери давления в рукавной линии длиной 1000 м находим по формуле

$$\Delta P_{\text{Р}} = \rho g S Q^2 n,$$

где ρ – плотность водного раствора пенообразователя, $\text{кг}/\text{м}^3$;

g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$;

S – сопротивление рукава длиной 20 м, $\text{с}^2/\text{м}^5$;

$n = l/20=50$ – количество рукавов.

Выбираем прорезиненные рукава диаметром 51 мм, для которых $S = 0,13 \cdot 10^6 \text{ с}^2/\text{м}^5$. Тогда $\Delta P_{\text{Р}} = 0,064 \text{ МПа}$, а $\Delta P_{\text{МС}} = 0,0032 \text{ МПа}$.

Горизонтальные горные выработки, как правило, имеют небольшой уклон 0,004...0,005 для облегчения транспортирования и обеспечения стока воды к водосборнику. При длине рукавной линии 1000 м перепад высот h , м, равен около 5 м, а давление, необходимое для подачи водного раствора пенообразователя на эту высоту:

$$\Delta P_{\text{Y}} = \rho g h = 0,05 \text{ МПа}.$$

Следовательно, потребное давление в пожарно-оросительном трубопроводе, обеспечивающее нормальную работу устройства, пеногенератора

и подачу водного раствора пенообразователя на расстояние 1000 м по горизонтальной выработке должно быть не менее

$$P_{\text{ПОТ}} \approx 0,95 \text{ МПа.}$$

Таким образом, нормативный диапазон давления в пожарно-оросительном трубопроводе 0,6...1,5 МПа не в полной мере соответствует требованиям правильной работы пеногенератора, что влечет за собой ограничение области применения пеногенератора для тушения пожаров на выработки, в которых $P_{\text{ПОТ}} < 0,95$ МПа. Сокращение длины рукавной линии с целью расширения диапазона рабочего давления пожарно-оросительного трубопровода неэффективно в связи с незначительными потерями давления в рукавной линии по отношению к суммарным, поскольку $\frac{\Delta P_{\text{P}}}{\Delta P_{\text{ПОТ}}} \cdot 100 \approx 6,7 \%$. В то же время

неснижаемая потеря давления на регуляторе расхода воды ΔP_{PP} и требуемое давление на входе в пеногенератор $P_{\text{ПГ}}$ составляет $\frac{\Delta P_{\text{PP}} + \Delta P_{\text{ПГ}}}{\Delta P_{\text{ПОТ}}} \cdot 100 \approx 84,2 \%$

от общих потерь давления в линии подачи воды и водного раствора пенообразователя к пеногенератору. В связи с вышеизложенным следует считать областью применения устройства для получения и подачи водного раствора пенообразователя на большие расстояния горные выработки, в которых давление в пожарно-оросительном трубопроводе 0,95...1,50 МПа. Если давление в пожарно-оросительном трубопроводе находится в указанном диапазоне, то дополнительную высоту h_g , м, на которую может быть подан водный раствор пенообразователя, находим по формуле

$$h_g = \frac{(P_{\text{ПОТ}} - 0,95) \cdot 10^6}{\rho g}.$$

Так, при наибольшем давлении 1,5 МПа наибольшая высота подачи водного раствора пенообразователя равна $h_g \approx 56$ м.

Выводы

Подача водного раствора пенообразователя на расстояние 1000 м позволяет эжекционному сеточному пеногенератору обеспечить устойчивую работу и устранить влияние противодавления пены на эффективность работы. В то же время повышаются требования к уровню давления в пожарно-оросительном трубопроводе. При транспортировании водного раствора пенообразователя на 1000 м минимальный уровень давления в пожарно-оросительном трубопроводе в горизонтальной горной выработке должен быть не менее 0,95 МПа при допустимом диапазоне давлений 0,6...1,5 МПа. Это

означает, что область применения эжекционных пеногенераторов для дистанционного тушения пожаров – выработки, в которых давление в пожарноросительном трубопроводе находится в диапазоне 0,95...1,50 МПа.

Список литературы / References

1. Боднарук, В.Б. Анализ систем дозирования пенообразователя современных пожарных насосов : обзор / В.Б. Боднарук, И.Н. Вертячих // Чрезвычайные ситуации. Сер. «Образование и наука» / ГИИ МЧС Республики Беларусь. – 2012. – Т. 7, № 1. – С. 3 – 16.

Bodnaruk, V.B., Vertyachikh, I.N. *Analiz sistem dozirovaniya penoobrazovatelya sovremennykh pozharnykh nasosov: obzor* [Analysis of foaming agent proportioning systems of modern fire pumps: review]. *Chrezvychaynyye situatsii. Ser. "Obrazovaniye i nauka"* [Emergency situations: Series "Education and science"]. GII MChS Respubliki Belarus' Press, 2012, vol. 7, no. 1, pp. 3 – 16.

2. Боднарук, В.Б. Обзор систем дозирования пенообразователя пожарных насосов / В.Б. Боднарук, И.Н. Вертячих // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2013. – № 4. – С. 44 – 51.

Bodnaruk, V.B., Vertyachikh, I.N. *Obzor sistem dozirovaniya penoobrazovatelya pozharnykh nasosov* [Survey of foaming agent portioning systems of fire pumps]. *Pozhary i chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye, likvidatsiya – Fires and emergency situations: prevention, elimination*, 2013, no. 4, pp. 44 – 51.

3. Всё о системах дозирования пенообразователя [Электронный ресурс]. URL: www.to-inform.ru/index.php/archive/item/vse-o-sistemax-doziro-vania-penoobrazovatelya (дата обращения: 21.01.2020).

Vsye o sistemakh dozirovaniya penoobrazovatelya [Elektronnyy resurs]. [All about foaming agent portioning systems] (Electronic resource). Available at: www.to-inform.ru/index.php/archive/item/vse-o-sistemax-doziro-vania-penoobrazovatelya (accessed: 21.01.2020).

4. Ковалишин, В.В. Дослідження залежності кратності повітряно-механічної піни від розміру вічка сітки піногенератора / В.В. Ковалишин, О.В. Гришовінчук, В.І. Луц // Пожежна безпека: збірник наукових праць / ЛДУ БЖД, УкрНДІПБ МНС України. – Львів, 2010. – № 16. – С. 54–59.

Kovalyshyn, V.V., Hryshovinchuk, O.V., Lushch, V.I. *Doslidzhennia zalezhnosti kratnosti povitriano-mekhanichnoi piny vid pozmiru vichka sitky pinoheneratora* [Investigations of dependence of air-mechanical foam ratio on size of a foam generator net cell]. *Pozhezhna bezpeka: zbirnyk naukovykh prats' / LDU BZhD, UkrNDIPB MNS Ukrainy* [Fire safety: collected scientific papers / LDU BZhD, UkrNDIPB MNS Ukrainy]. Lvov, 2010, no. 16, pp. 54 – 59.

5. Пашковский, П.С. Конструктивные особенности эжекционных пеногенераторов / П.С. Пашковский // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2016. – № 2(53). – С. 15 – 25.

Pashkovskiy, P.S. *Konstruktivnyye osobennosti ezheksionnykh penogeneratorov* [Constructional features of ejection foam generators]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 2(53), pp. 15 – 25.

6. Дозирующее устройство для подачи воды в смесительно-нагнетательную установку / В.Г. Агеев, Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, А.В. Еремин // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2019. – № 1 (56). – С. 7 – 16.

Ageyev, V.G., Peftibay, G.I., Galukhin, N.A., Yeryomin, A.V. *Doziruyushcheye ustroystvo dlya podachi vody v smesitel'no-nagnetatel'nyuyu ustanovku* [A metering device for water feed into a mixing-force installation]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 7 – 16.

7. Пашковский, П.С. Повышение эффективности возведения взрывоустойчивых перемычек гидромеханическим способом в горных выработках шахт / П.С. Пашковский, Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин // Вестник Академии гражданской защиты. – 2019. – Вып. 2(18). – С. 78 – 86.

Pashkovskiy, P.S., Peftibay, G.I., Galukhin, N.A. *Povysheniye effektivnosti vozvedeniya vzryvoustoychivyykh peremychek gidromekhanicheskim sposobom v gornyykh vyrabotkakh shakht* [Effectiveness improvement of blast-resistance stoppings erection applying hydro-mechanical method in mine workings]. *Vestnik Akademii grazhdanskoy zashchity* [Civil Defence Academy Journal of EMERCOM of DPR: scientific journal]. Donetsk, 2019, issue 2(18), pp. 78 – 86.

8. Шаровые краны F.I.V. [Электронный ресурс]. URL: www.teplotehnik.narod.ru/pdf/FIV.pdf (дата обращения: 21.01.2020).

Sharovyye krany F.I.V. [Elektronnyy resurs] [The F.I.V. ball valves] (Electronic resource). Available at: www.teplotehnik.narod.ru/pdf/FIV.pdf (accessed: 21.01.2020).

9. Сетчатые фильтры тип FVF [Электронный ресурс]. URL: www.ktto.com.ua/uploads/fsf-1-2013-07-22-50-51-30.pdf (дата обращения: 21.01.2020).

Setchatyye fil'try tip FVF [Elektronnyy resurs] [Net filter, FVF type] (Electronic resource). Available at: www.ktto.com.ua/uploads/fsf-1-2013-07-22-50-51-30.pdf (accessed: 21.01.2020).

10. Клапан обратный пружинный муфтовый с латунным золотником [Электронный ресурс]. URL: www.valtec.ua/document/technical /VT.151-0717-UKR.pdf (дата обращения: 21.01.2020).

Klapan obratnyy pruzhinnyy muftovyy s latunnym zolotnikom [Elektronnyy resurs] [Reverse spring coupler valve with brass sliding piston] (Electronic resource). Available at: www.valtec.ua/document/technical /VT.151-0717-UKR.pdf (accessed: 21.01.2020).

Georgy Ivanovich Peftibay, head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;
Nikolay Aleksandrovich Galukhin, scientific associate; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru;
Nikita Grigoryevich Zinchenko, engineer of the 1st category; e-mail: niigd.osmas-5@mail.ru;
Anton Vitalyevich Yeryomin, design engineer of the 1st category; e-mail: a.v.eregin18@gmail.com
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062)332-78-36, 332-78-38

GENERATION AND DELIVERY OF AN AQUEOUS SOLUTION OF FOAMING AGENT AT LARGE DISTANCES

Purpose. Creation of a device for generation and delivery of the foaming agent aqueous solution at large distances with an offset foam generator, calculation of hydraulic losses in water and foaming agent aqueous solution transport lines, determination of the application area.

Methods. Construction diagram synthesis with the three-dimensional modeling applied. Analytical methods of calculation of the pressure losses in a hose line and local resistances.

Results. The principal hydraulic circuit diagram and the construction of the device for generation and delivery of the foaming agent aqueous solution at large distances with the external foam generator and pumped foaming agent feed have been developed. The calculation of the pressure losses along the length of the water and foaming agent aqueous solution transport line has been conducted, the application area has been defined.

Scientific novelty. It has been shown that the share of pressure losses in the long hose line of 1000 m in length and 51 mm in diameter makes approximately 6.7 %, the irreducible share of pressure losses at the water-flow regulator and the foam generator makes approximately 84.2 % of the total pressure losses, and the total pressure losses make about 0.95MPa which considerably exceeds the lower normative pressure limit in a fire-hose pipeline. It narrows the application area of the foam fire extinguishment at the mine workings where the pressure in the fire-hose pipeline is less than 0.95 MPa.

Practical value. The application area of the remote fire extinguishment with air-mechanical foam in the inaccessible places of mine workings has been determined. It has been demonstrated that it is impossible to extend substantially the application area at the expense of reducing the hose line.

Keywords: *hose line; proportioning; foaming agent; pumped feed; pressure losses; foam generator.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [622.868:622.411.3]:[62-543.27.05]-519

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, заместитель директора (по научной работе); e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: avrstla@mail.ru;

Александр Владиславович Агарков, инж. I кат.; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-34*

СПОСОБ ДИСТАНЦИОННОГО ОТБОРА И АНАЛИЗА ПРОБ ШАХТНОГО ВОЗДУХА

Цель. Анализ недостатков отечественных и зарубежных технологий и оборудования для дистанционного мониторинга и контроля газовой обстановки на аварийных участках угольных шахт, поиск перспективных направлений совершенствования способа дистанционного отбора и анализа проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ, а также разработка функциональной схемы усовершенствованной системы дистанционного отбора проб на примере установки эжекторной УЭ-1М.

Методы. Использован аналитический метод исследования, включающий анализ и обработку специальных литературных источников, а также методы проектирования функциональных схем в системе автоматизированного проектирования и черчения AutoCAD и моделирования работы в программе FluidSIM.

Результаты. Дана оценка недостатков и предложены перспективные направления совершенствования способа дистанционного контроля шахтной среды с целью повышения достоверности газового контроля аварийных участков шахт.

Научная новизна. Предложена функциональная схема усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ подразделениями горноспасательной службы, достоверность которой подтверждена путем моделирования ее работы.

Практическая значимость. Результаты проведенного исследования служат основой для разработки технического задания и конструкторской документации на усовершенствованную систему дистанционного отбора проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: шахта; горноспасательная служба; аварийный участок; подземные пожары и взрывы; дистанционный отбор и анализ проб шахтного воздуха; контроль газовой обстановки; установка эжекторная УЭ-1М; пробоотборный трубопровод; аварийно-спасательные работы.

Постановка проблемы. Основными направлениями экономического и социального развития многих стран и государств предусмотрено дальнейшее развитие угольной промышленности – одной из ключевых отраслей хозяйства, залогом энергетической и государственной безопасности, гарантом бесперебойной и эффективной работы металлургической, коксохимической и других отраслей промышленности [1]. Однако при постоянном повышении уровня промышленной безопасности и противопожарной защиты на шахтах пожары остаются одним из наиболее распространенных видов подземных аварий, ликвидация которых сопряжена с опасностью взрыва газозвдушной

смеси. При ликвидации пожаров нередко возникают условия, опасные для жизни горноспасателей, поэтому организация дистанционного контроля шахтной среды и получение достоверных данных о газовой обстановке аварийного участка в течение всего периода ликвидации аварии – одно из главных условий безопасного и успешного тушения пожаров.

Основные данные, по которым можно судить о состоянии пожара на аварийном участке, – результаты анализа шахтного воздуха, отобранного дистанционным способом, путем определения концентраций метана (CH_4), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO_2), кислорода (O_2), водорода (H_2), а при необходимости – других газов [2].

Дистанционный контроль газовой обстановки аварийного участка осуществляется путем отбора проб шахтного воздуха по специально проложенному пробоотборному трубопроводу с последующим их анализом в специализированной газоаналитической лаборатории. Система дистанционного отбора проб шахтного воздуха состоит из побудителя расхода, пробоотборного трубопровода, а также вспомогательных приспособлений и инструментов. Принцип работы системы основан на непрерывном прокачивании газозадушной смеси через пробоотборный трубопровод благодаря разрежению, создаваемому побудителем расхода. За время прокачивания трубопровода происходит продувка линии дистанционного отбора, достаточная для получения пробы [3].

Однако недостаток существующего способа – невысокая достоверность отобранных проб, так как в практике ликвидации пожаров имеют место случаи взрывов газозадушных смесей, в то время как по результатам анализа дистанционно отобранных проб воздуха смесь была не взрывчатой, а также обратная ситуация, когда по результатам дистанционного контроля шахтной среды аварийного участка наблюдали взрывоопасную обстановку, а взрывов не было [4].

Существующий способ дистанционного отбора и анализа проб шахтного воздуха не позволяет оперативно и в полном объеме оценить газовую обстановку аварийного участка, а также часто оказывается малоэффективным и не отвечает условиям безопасности. Поэтому совершенствование способа дистанционного отбора и анализа проб шахтного воздуха, а также установление факторов, влияющих на получение достоверных данных о газовой обстановке на аварийном участке, – актуальное направление исследований.

Анализ последних исследований. Решению проблемы дистанционного контроля шахтной среды при ведении аварийно-спасательных работ посвящены научные труды ведущих ученых и инженеров: З.А. Аксенцева, Д.И. Божко, И.Н. Зинченко, Е.Ф. Карпова, В.И. Ковальчука, Ю.А. Когана, А.Л. Романчука, Н.И. Севастьянова, В.С. Сергеева, Б.А. Сурначева, А.П. Федоровича, D. Adler, F. Burns, D. Chapman, B. Ciepiela, C. Fauconnier, Z. Fink, T. Golisz, A. Kukuczka, W. Marchewka, D. Mitchell, R. Morris, R. Zipf и др. [5 – 9]. В работе [3] представлен обзор и анализ научных работ данных авторов.

Однако, несмотря на комплексное исследование данной проблемы и разработку технических средств, способ дистанционного контроля шахтной среды на сегодня недостоверный. Поэтому актуальная научно-техническая задача – повышение точности контроля газовой обстановки путем совершенствования способа дистанционного отбора и анализа проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ.

Цель настоящей статьи – анализ недостатков технологий и оборудования для дистанционного мониторинга и контроля газовой обстановки в аварийных участках шахт, поиск перспективных направлений совершенствования способа дистанционного отбора и анализа проб шахтного воздуха при ведении аварийно-спасательных работ, а также разработка функциональной схемы усовершенствованной системы дистанционного отбора проб на примере установки эжекторной УЭ-1М.

Материалы и результаты исследований. Из общего количества аварий на угольных шахтах наибольший удельный вес имеют пожары, доля этого вида подземных аварий в процентном соотношении занимает лидирующую позицию с показателем 45 %. За период с 2007 по 2018 г. подразделениями горноспасательной службы ликвидировано 119 пожаров в шахтах, при этом 78 (65,5 %) потушено активным способом, а 41 (34,5 %) – пассивным и комбинированным способами. На рис. 1 представлена динамика распределения подземных пожаров по способам их тушения.

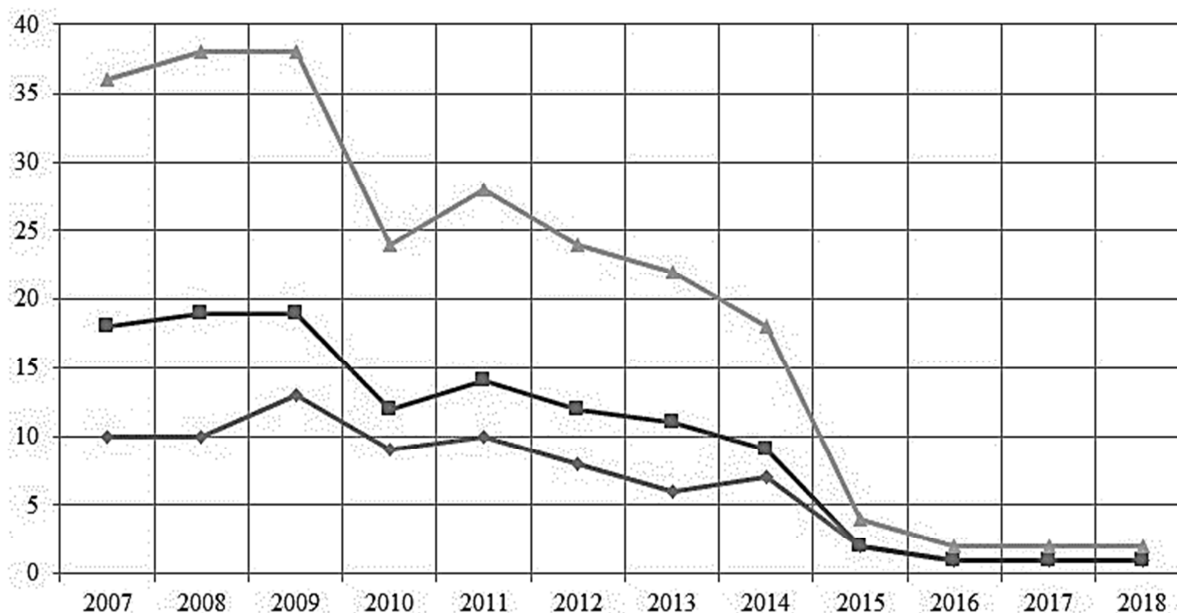


Рис. 1. Распределение подземных пожаров по способам их тушения подразделениями горноспасательной службы:

◆ активный способ; ■ пассивный и комбинированный способы;
▲ всего ликвидированных пожаров

При ликвидации подземных пожаров нередко возникают условия, опасные для жизни горноспасателей. Соответственно подразделения горноспасательной службы используют способ дистанционного контроля шахтной среды с целью получения данных о газовой обстановке (концентрация горючих и взрывоопасных газов) в аварийных участках (выработках). Газовый анализ шахтной среды дает возможность определить размеры аварии, стадию ее развития, а также установить границы заполнения газом выработок для выбора подземных баз и зоны работы без респираторов, эффективность принятых мер для проветривания аварийного участка.

Согласно статистике [10], частота использования системы дистанционного отбора проб воздуха – в среднем три раза в год. При этом в качестве средств побудителей расхода для дистанционного отбора проб воздуха применяют установку эжекторную УЭ-1М, вакуум-насос ВН-461М и аспиратор эжекторный АЭРА (см. таблицу).

Основные характеристики побудителей расхода

Параметр	Значение параметра		
	Установка эжекторная УЭ-1М	Вакуум-насос ВН-461М	Аспиратор эжекторный АЭРА
Питание побудителя расхода	Баллон со сжатым воздухом; шахтная пневмосеть	Шахтная пневмосеть, электросеть	Баллон со сжатым воздухом
Максимальная удаленность побудителя расхода от места отбора проб воздуха, м	1000	2000	1000
Производительность побудителя расхода (объемная скорость прокачивания воздуха по прободоотборному трубопроводу), л/мин	30...40	50	20
Разрежение, обеспечиваемое побудителем расхода, при максимальной длине трубопровода, кПа	20...30	95	...
Время откачивания пробы воздуха при максимальной длине прободоотборного трубопровода, мин	12	30	15

Окончание

Параметр	Значение параметра		
	Установка эжекторная УЭ-1М	Вакуум- насос ВН-461М	Аспиратор эжекторный АЭРА
Время набора пробы объемом 500 мл в латексную камеру, мин	1,5		
Габариты побудителя расхода, мм	375×265×165	530×300×415	410×225×130
Масса побудителя расхода (без пробоотборного трубопровода), кг	9,5	64	8

После отбора проб шахтного воздуха анализируют их газовый состав, как правило, в условиях специализированной газоаналитической лаборатории с использованием газоанализаторов «Сигма-СО-602», ООГ-2.

На основании ранее проведенных исследований [3, 4, 8] установлено, что система дистанционного отбора проб шахтного воздуха, используемая сегодня, имеет ряд недостатков, влияющих на достоверность анализа газовоздушной обстановки аварийных участков:

- отсутствие возможности оперативного контроля газовой обстановки аварийного участка с короткими интервалами времени при анализе отобранных проб воздуха в специализированных газоаналитических лабораториях, поскольку за время доставки и химического анализа проб в лаборатории (несколько часов) на аварийном участке газовая обстановка может существенно измениться, в связи с чем решения по ликвидации аварии принимают с опозданием;

- вероятность получения недостоверных проб воздуха из аварийного участка, ввиду нарушений герметичности на стыках (в местах соединения) пробоотборного трубопровода, его высокой газопроницаемости и сорбционной способности, повреждения при транспортировании и прокладывании, а также в результате взрывов или обрушений, вследствие чего происходит разбавление отбираемой пробы воздухом нормальной среды;

- погрешность анализа газовой обстановки ввиду точечного отбора проб шахтного воздуха с помощью пробоотборного трубопровода, закрепляемого на уровне 2/3 высоты горной выработки от почвы;

- влияние конденсации и скапливания влаги в результате провисаний пробоотборных трубопроводов, что создает дополнительное сопротивление работе побудителю расхода и приводит к снижению эффективности работы пробоотборной системы в целом. Значительное количество влаги в отобранной пробе также приводит к недостоверной оценке ее газовой концентрации при использовании ряда портативных газоанализаторов.

В ходе исследований установлено, что для максимального сокращения времени с момента отбора пробы воздуха до момента получения результатов ее газового анализа, с целью оперативного контроля газовой обстановки в относительно сжатые сроки, пробы шахтного воздуха необходимо отбирать и анализировать в условиях шахты на безопасном расстоянии от аварийного участка с помощью хроматографов портативных горноспасательных «Поиск-2», интерферометров шахтных типа ШИ, газоопределителей химических типа ГХ, а также зарубежных хроматографов и многоканальных газоанализаторов Dräger и пр.

Чтобы исключить поступление свежего воздуха вследствие нарушения герметичности в местах соединения пробоотборного трубопровода из поливинилхлорида, необходима тщательная проверка герметичности трубопроводов, а также качественная их прокладка, уплотнение во избежание поступления воздуха нормальной среды и стыковка с помощью компрессионных фитингов или штуцеров с хомутами.

Поскольку пожарные газы скапливаются у кровли выработки (метан, водород) и у почвы (диоксид углерода) в результате образования слоевых и местных скоплений, пробы воздуха, отобранные только в средней части сечения выработки, будут иметь усредненное значение в результате их газового анализа и не гарантируют достоверного газового анализа аварийного участка. Поэтому дистанционный контроль газовой обстановки по сечению горной выработки возможен с помощью вспомогательного пробоотборного приспособления (многоточечного пробоотборника), состоящего из коллектора, специального держателя и шести ответвленных линий пробоотборных трубопроводов и обеспечивающего отбор проб воздуха по высоте и сечению горной выработки. Пробоотборное приспособление стыкуют непосредственно с гибким пробоотборным трубопроводом и устанавливают на почву.

С целью устранения негативного влияния конденсата на циркуляцию газа в системе пробоотборных трубопроводов, а также для повышения эффективности работы пробоотборной системы необходимы разработка и использование фильтров-влажнителей, устанавливаемых между секциями трубопровода в местах значительного перепада температур на небольших расстояниях, и фильтра-осушителя перед побудителем расхода или буферным резервуаром для набора пробы воздуха в камеру (в зависимости от побудителя расхода). Фильтры-влажнители позволяют значительно уменьшить скапливание в пробоотборном трубопроводе влаги, которая может препятствовать движению газовой пробы. Использование фильтра-осушителя позволит обеспечить достаточное высушивание анализируемых пожарных газов, имеющих нередко весьма значительную влажность, перед их попаданием в сосуды (камеры) для отбора проб воздуха. Также необходимо использовать фильтры для предохранения от засорения пылью и механическими примесями,

если таковые не предусмотрены заводской характеристикой побудителя расхода.

Достоверность предложенной схемы (рис. 2) подтверждена путем разработки ее пневматической схемы и моделирования работы усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха в программе FluidSIM [11], позволяющей проектировать и моделировать работу пневматических сетей.

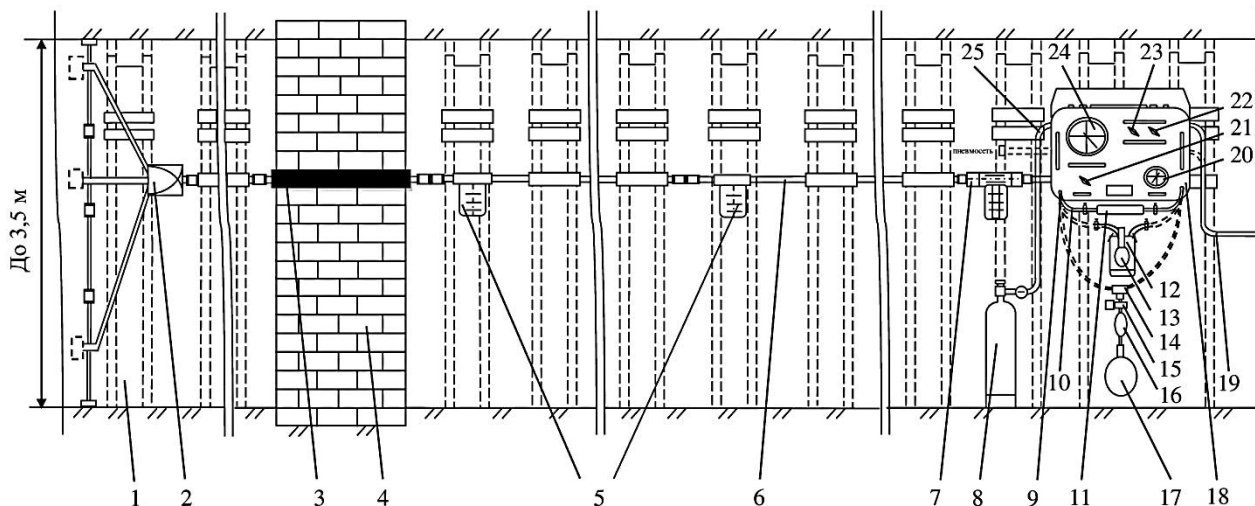


Рис. 2. Функциональная схема усовершенствованной системы дистанционного отбора проб воздуха в изолированном пожарном участке на примере установки эжекторной УЭ-1М:

1 – изолированное пространство аварийного участка; 2 – многоточечный пробоотборник; 3 – трубопровод, монтируемый в изолирующее сооружение при его возведении; 4 – изолирующее сооружение; 5 – фильтры-влагоотделители; 6 – пробоотборный трубопровод; 7 – фильтр-осушитель; 8 – баллон (с редуктором) со сжатым воздухом; 9 – штуцер-проба; 10 – соединительные трубки с зажимными кранами; 11 – сосуд для отбора проб шахтного воздуха; 12 – буферный резервуар для набора пробы шахтного воздуха в камеру (пробонаборное устройство); 13, 17 – камеры для отбора проб шахтного воздуха; 14 – металлический соединительный тройник; 15 – запорный кран; 16 – резиновая груша; 18 – установка эжекторная УЭ-1М; 19 – отводной трубопровод для сброса воздуха в окружающую среду; 20 – манометр; 21, 22, 23 – краны выбора режимов работы и питания; 24 – вакуумметр; 25 – трубопровод соединительный

Оптимальный диаметр пробоотборного трубопровода зависит от его длины и определяют его по формуле

$$d = 0,46 + \frac{l}{1500}, \quad (1)$$

где d – внутренний диаметр пробоотборного трубопровода, см;
 l – длина трубопровода, м.

Расчетный диаметр округляют в большую сторону до ближайшего стандартного диаметра.

Производительность установки Q , л/мин, зависит от длины и диаметра пробоотборного трубопровода, и определяют ее по формуле

$$Q = \frac{1020}{0,2l/d^4 + 60} \quad (2)$$

Точка на кривой (рис. 3), начиная с которой расход воздуха в трубопроводе перестает зависеть от его параметров, – критическая (точка А). Критической точке соответствует критический диаметр трубопровода [12]. В этом случае увеличение диаметра трубопровода приведет лишь к увеличению габаритов, массы и, следовательно, стоимости установки для дистанционного отбора проб воздуха.

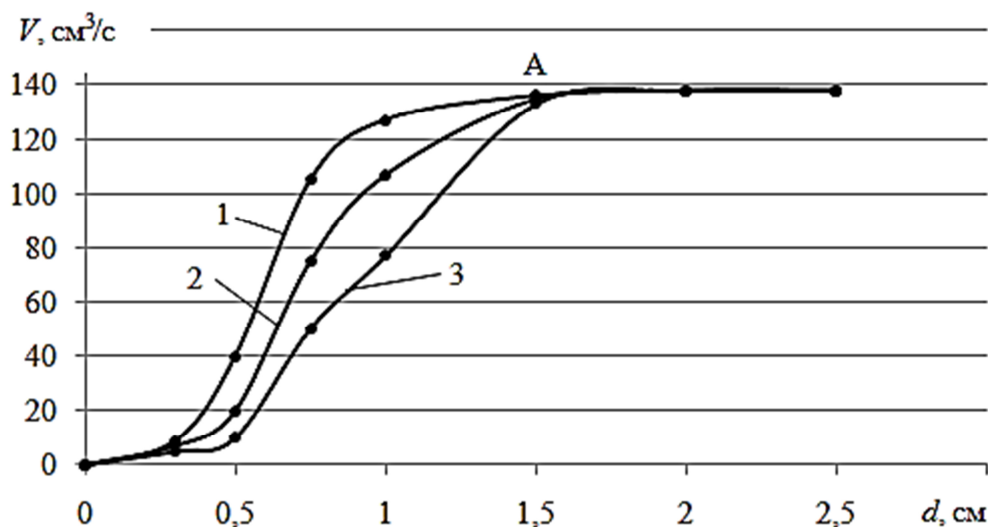


Рис. 3. Зависимость расхода воздуха в пробоотборном трубопроводе от его внутреннего диаметра при длине:
1 – 200 м; 2 – 500 м; 3 – 1000 м; А – критическая точка

Время транспортирования пробы по пробоотборному трубопроводу τ_T , мин, определяют по формуле

$$\tau_T = l/1000 \left(\frac{0,0165l}{d^2} + 4,7d^2 \right). \quad (3)$$

Скорость движения шахтного воздуха в трубопроводе V , м/мин, определяют по формуле

$$V = l / \tau. \quad (4)$$

Перед отбором проб пробоотборный трубопровод продувают исследуемым воздухом. Время продувки $\tau_{пр}$, мин, определяют по формуле

$$\tau_{пр} = 0,095ld^2/Q_{ф}, \quad (5)$$

где $Q_{ф}$ – фактический расход воздуха в трубопроводе, л/мин.

Выводы. В ходе проведенного исследования проанализированы недостатки технологий и оборудования дистанционного контроля газовой обстановки в аварийных участках шахт, предложены перспективные направления совершенствования способа дистанционного отбора и анализа проб шахтного воздуха с целью повышения достоверности газового контроля аварийных участков при ведении горноспасательных работ.

Разработка и внедрение усовершенствованной системы дистанционного отбора проб шахтного воздуха – одна из важных составляющих для создания безопасных условий труда горноспасателей в шахтах при ликвидации аварий и будет способствовать повышению уровня эффективности ведения аварийно-спасательных работ.

Список литературы / References

1. Dr. Klaus Brendow. World coal perspectives to 2030 (World Energy Council, Geneva/London) [Electronic resource]. Available at: https://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2012/10/PUB_Sustainable_Global_Energy_Development_The_Case_for_Coal_2004_Exec_summary_WEC.pdf (accessed: 15.01.2020).

2. Агарков, Ал.В. Контроль состояния воздушной среды в аварийных участках угольных шахт дистанционным методом / Ал.В. Агарков, А.М. Симонов, А.В. Мавроди // Вестник Академии гражданской защиты. – Донецк, 2019. – № 2(18). – С. 73 – 77.

Agarkov, Al.V., Simonov, A.M., Mavrodi, A.V. *Kontrol' sostoyaniya vozdushnoy sredy v avariynykh uchastkakh ugol'nykh shakht distantsionnym metodom* [Air condition monitoring in accident prone sections of coal mines applying the remote method]. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity: nauch. zhurn.* [Civil Defence Academy Journal of EMERCOM of DPR: scientific journal]. Donetsk, 2019, no. 2(18), pp. 73 – 77.

3. Мамаев, В.В. Способы и технические средства дистанционного контроля шахтной среды при ведении аварийно-спасательных работ / В.В. Мамаев, Ал.В. Агарков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования. – Донецк, 2019. – № 3(4). – С. 109 – 119.

Matayev, V.V., Agarkov, Al.V. *Sposoby i tekhnicheskiye sredstva distantsionnogo kontrolya shakhtnoy sredy pri vedenii avariyno-spasatel'nykh rabot* [Methods and technical means of the remote monitoring of the mine environment during emergency and rescue operations]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya*

bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya [Fire and technogenic safety: problems and ways of improvement]. Donetsk, 2019, no. 3(4), pp. 109 – 119.

4. Agarkov, A. Analysis of the emergency at the mining enterprises and evaluation of the method of remote selection of samples of mine air when conducting mine-rescue work / A. Agarkov // *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. – Донецк, 2019. – № 2(3). – С. 10 – 20.

Agarkov, A. Analysis of the emergency at the mining enterprises and evaluation of the method of remote selection of samples of mine air when conducting mine-rescue work. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya* [Fire and technogenic safety: problems and ways of improvement]. Donetsk, 2019, no. 2(3), pp. 10 – 20.

5. Опыт создания системы контроля параметров атмосферы за изолирующими перемычками [Электронный ресурс]. URL: <https://dprom.online/chindustry/opyt-sozdaniya-sistemy-kontrolya-parametrov-atmosfery-za-izoliruyushhimi-peremychkami/> (дата обращения: 15.01.2020).

Opyt sozdaniya sistemy kontrolya parametrov atmosfery za izoliruyushchimi peremychkami [Elektronnyy resurs] [Experience of creation of the control system of atmosphere parameters behind the sealing stoppings] (Electronic resource). Available at: <https://dprom.online/chindustry/opyt-sozdaniya-sistemy-kontrolya-parametrov-atmosfery-za-izoliruyushhimi-peremychkami/> (accessed: 15.01.2020).

6. Патент № 51401 Российская Федерация, МПК E21F17/00 (2006.01). Устройство для дистанционного отбора проб воздуха : № 2005118488/22 : заявл. 14.06.2005 : опубл. 10.02.2006 / Федорович А.П., Кулак Н.Г. ; заявитель ФГУП РосНИИГД. – 4 с. : ил.

Fedorovich, A.P., Kulak, N.G. *Ustroystvo dlya distantsionnogo otbora prob vozdukha* [Device for remote collection of air samples]. Patent RF, no. 51401, 2006.

7. Голик, А.С. Система мониторинга атмосферы локальных объектов (СМАЛО) для газового контроля горноспасателями в аварийных условиях шахт / А.С. Голик, О.С. Токарев // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. – Кемерово, 2013. – № 1.2. – С. 69 – 72.

Golik, A.S., Tokarev, O.S. *Sistema monitoringa atmosfery lokal'nykh ob'yektov (SMALO) dlya gazovogo kontrolya gornospasatelyami v avariynykh usloviyakh shakht* [The СМАЛО system of monitoring of the local objects atmosphere for gas control by mine-rescuers in the accident conditions of mines]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti – Bulletin of the scientific centre of operational safety in the mining industry “Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety)”*, Kemerovo, 2013, no. 12, pp. 69 – 72.

8. Agarkov, A. Analysis of foreign scientific works on development of technical means for remote gas sampling in coal mines / A. Agarkov // *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. – Донецк, 2020. – № 1(5). – С. 18 – 25.

Agarkov, A. Analysis of foreign scientific works on development of technical means for remote gas sampling in coal mines. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya* [Fire and technogenic safety: problems and ways of improvement]. Donetsk, 2020, no. 1(5), pp. 18 – 25.

9. Tube bundle system for monitoring of coal mine atmosphere [Electronic resource]. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4545479/> (accessed: 15.01.2020).

10. Агарков, Ал.В. Об аварийности в угольных шахтах и применении системы дистанционного контроля состава шахтной среды при проведении горноспасательных работ / Ал.В. Агарков // Инновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых [Электронный ресурс]: сборник научных трудов кафедры разработки месторождений полезных ископаемых. – Донецк: ГОУ ВПО «ДОННТУ», 2019. – № 5. – С. 294 – 313.

Agarkov, Al.V. *Ob avariynosti v ugol'nykh shakhtakh i primenenii sistemy distantsionnogo kontrolya sostava shakhtnoy sredy pri provedenii gornospasatel'nykh rabot* [On accident rate in coal mines and application of remote monitoring system of mine atmosphere composition during carrying-out the mine-rescue operations]. *Innovatsionnyye tekhnologii razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh [Elektronnyy resurs]: sbornik nauchnykh trudov kafedry razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* [Innovation technologies of exploitation of mineral deposits (Electronic resource): collection of scientific works of Department of exploitation of mineral deposits]. Donetsk, GOU VPO “DONNTU” Press, 2019, no. 5, pp. 294 – 313.

11. FluidSIM-5 : [Electronic resource]. Available at: <https://www.festo-didactic.com/ru-ru/4441/486/fluidsim/fluidsim-5.htm?fbid=cnUucnUuNTcxLjI5LjE4LjU5MS43OTc1> (accessed: 15.01.2020).

12. Симонов, А.М. Дистанционный отбор проб шахтного воздуха из изолированных пожарных участков / А.М. Симонов, Ал.В. Агарков, В.В. Захлебин // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 1 (56). – С. 37 – 46.

Simonov, A.M., Agarkov, Al.V., Zakhlebin, V.V. *Distantsionnyy otbor prob shakhtnogo vozdukha iz izolirovannykh pozharnykh uchastkov* [Remote collection of mine air samples from the sealed fire sections]. *Nauchnyy vestnik NIIGD “Respirator”: nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 37 – 46.

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director on science;

e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Aleksandr Mikhaylovich Simonov, head of department; e-mail: avrstla@mail.ru;

Aleksandr Vladislavovich Agarkov, engineer of the 1st category; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-34

METHOD OF REMOTE COLLECTION AND ANALYSIS OF MINE AIR SAMPLES

Purpose. Analysis of disadvantages of the domestic and foreign technologies and equipment for remote monitoring and gas condition control in accident prone sections of coal mines, search for promising directions of improvement of the remote sampling and analysis of mine air samples during carrying-out the emergency and rescue operations, as well as development of the functional diagram of the improved remote sampling system, taking as an example the УЭ-1М ejector installation.

Methods. The analytical method of investigation has been applied including analysis and processing of the special literature sources as well as methods of projecting the functional diagrams in the AutoCAD computer-aided design and drafting system and those of modeling the operation in the FluidSIM software.

Results. The assessment of the disadvantages has been given and the promising directions for improvement of the remote monitoring of the mine environment with a purpose of increasing the gas monitoring reliability of the accident prone sections of mines have been suggested.

Scientific novelty. The functional diagram of the improved system of remote collection of the mine air samples during the emergency and rescue operations by the mine-rescue service subdivisions has been proposed, its reliability has been proven by modeling its operation.

Practical value. The results of the conducted investigation serve as the basis for elaboration of the requirement specification and the design documentation of the improved system of remote mine air sampling during carrying-out the emergency and rescue operations.

Keywords: *mine; mine-rescue service; accident prone section; underground fires and explosions; remote collection and analysis of mine air samples; gas condition monitoring; the УЭ-1М ejector installation; sampling pipeline; emergency and rescue operations.*

УДК 622.822.22:[552.574:622.831.322]

Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: v.orlikova.69@gmail.com

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81*

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЯ ПРИ ЕГО ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСАХ

Цель. Изучение химической активности угля, выброшенного из зоны газодинамического явления.

Методика. Лабораторные и аналитические исследования сорбционных характеристик угля и показателей склонности его к самовозгоранию с помощью хроматографического метода.

Результаты. Использование газоадсорбционной хроматографии позволило провести сравнительный анализ времени удерживания кислорода в порах угля и его внешней реагирующей поверхности для проб, отобранных из ненарушенного пласта и выброшенного в результате газодинамического явления. Определена критическая температура самовозгорания угля и показана ее высокая корреляция с сорбционными параметрами гетерогенной реакции окисления исследуемых проб. Установлена более низкая критическая температура самовозгорания угля и высокое значение константы скорости окисления при этой температуре, свидетельствующее об увеличении химической активности выброшенного угля.

Научная новизна. Исследование влияния газодинамического явления на изменение физико-химических свойств угля с помощью газохроматографического метода.

Практическая значимость. Исследования угля в зоне геологических нарушений пласта позволяют предупредить возникновение самовозгорания угля в этой зоне и повысить безопасность труда на угледобывающих предприятиях.

Ключевые слова: *внешняя реагирующая поверхность; критическая температура самовозгорания; время удерживания; уголь; выброс; газодинамическое явление.*

Постановка проблемы. Технологический процесс добычи угля на предприятиях Донбасса протекает в сложных геологических условиях, что приводит к газодинамическим явлениям, сопровождаемым внезапными выбросами угля и газа. За 2019 г. из общего количества работающих угольных предприятий ДНР четыре отнесены к сверхкатегорийным по метану и 14 шахт – опасны по внезапным выбросам угля и газа. Наиболее многочисленные выбросы угля и газа происходят в зоне геологических нарушений газоносного пласта в результате сотрясательного взрывания, бурения скважин и шпуров, разрушения углепородного массива взрывным способом. Выбросы, индуцированные взрыванием, могут происходить на опасных и не опасных по самопроизвольным выбросам пластах, а также в газоносных горных породах. Работа взрывчатого вещества заменяет концентрированные нагрузки горных пород и реализацию потенциальной энергии деформации при внезапном изменении напряжений; поэтому индуцированный выброс может произойти в углях или породе аналогично тому, как это происходит при горных ударах [1].

При соблюдении технологического режима ведения горных работ, предусмотренного нормативными документами, внезапные выбросы угля и газа

не должны приводить к травматизму работающих, однако они ухудшают безопасность труда, приводят к материальным потерям и затратам на ликвидацию последствий.

Анализ последних исследований. Внезапные выбросы угля и газа – сложное явление, обусловленное изменением (перераспределением) напряжённо-деформированного и газодинамического состояния угольных пластов и вмещающих пород, а также особенностями структуры и физико-механических свойств угля и пород. В пласте и его боковых породах под воздействием тектонических процессов образовывались системы микро- и макротрещин, появлялась дополнительная пустотность, которая заполнялась десорбирующимся метаном. В угленосных отложениях метан находится в физико-химической связи с углем, образуя преимущественно твердый углегазовый раствор. Эмиссия метана возможна только при нарушении термодинамического состояния системы и распаде указанного раствора [2]. При выбросе метан дополнительно способствует транспортированию фрагментов угля и пород из полости в выработку, изменяя их механические и физико-химические характеристики.

При внезапном выбросе угля и газа происходит разрушение твердого топлива с разрывом наиболее слабых связей в его периферийной части, в том числе отрывается большое количество метильных групп $-CH_3$, которые, объединяясь с атомами водорода, образуют дополнительный объем метана, равный, по оценкам реальных выбросов, $40...50 \text{ м}^3/\text{т}$ [3].

Механохимическая деструкция приводит к мелкому дроблению угля (фракции размером $0,08 \text{ мм}$ могут составлять $14...37 \%$ массы выброса), при этом сокращается доля диффузии и фильтрации, а процесс газовыделения становится мгновенным [4].

В результате проведенного комплексного научного анализа геомеханического и термохимического поведения образцов углей различных стадий метаморфизма, базирующегося на исследованиях трех шахтопластов Кузбасса с различными физико-химическими свойствами (газоносность $13...20 \text{ м}^3/\text{т}$, выход летучих веществ $20...36 \%$, глубина залегания пластов $200...600 \text{ м}$) показано существование генетической связи между выбросо- и пожароопасностью угольных пластов, диктуемой геомеханико-динамическими и термохимическими условиями формирования угольных месторождений [2]. Однако большинство исследований посвящено изучению процесса выделения метана из угля [5, 6] как одного из главных факторов возникновения внезапного выброса угля и газа. В работе [7] представлены результаты сорбционного и спектроскопического исследования свойств угля пласта l_3 шахты «Краснолиманская» до и после внезапного выброса. Проведенные эксперименты дают основание полагать, что увеличение концентрации в угле метана и летучих веществ создает условия для возникновения газодинамического явления.

Таким образом, в результате внезапного выброса угля и газа происходит механическое измельчение частиц угля, сопровождаемое химическими превращениями с разрывом молекулярной связи, изменение кинетики

выделения метана и доли летучих веществ, увеличение удельной поверхности частиц. Следует предположить, что перечисленные изменения будут влиять на процесс окисления частиц угля кислородом воздуха, поэтому **цель данных исследований** – изучение химической активности угля, выброшенного из зоны газодинамического явления.

Материалы и результаты исследований. После проведения работ в режиме сотрясательного взрывания на участке пласта l_4 шахты «Комсомолец Донбасса» произошло газодинамическое явление – внезапный выброс угля и газа.

Угольный пласт l_4 – опасный по внезапным выбросам угля и газа ниже отметки 645 м. Отработка пласта осложняется наличием газонасыщенных зон интенсивной тектонической трещиноватости, резких колебаний гипсометрии пласта и тектоническими нарушениями дизъюнктивного и пликативного типа, т.е. с разрывом и без разрыва сплошности слоев. При проведении конвейерного штрека западной лавы пласта l_4 на горизонте 810 м прогнозировалось геологическое нарушение дизъюнктивного типа. Сложные горно-геологические условия залегания пласта и способы его разработки индуцировали внезапный выброс угля и газа. Гранулометрический анализ пробы выброшенного угля показал наличие фракции от 10 до 20 мм в количестве 39,2 %, от 5 до 10 мм 18,4 % и меньше 0,25 мм 19 %. Остальное количество частиц (23,4 %) распределено между фракциями от 0,5 до 5 мм. Образование большого количества мелких частиц угля в результате его механического разрушения приводит к увеличению реагирующей поверхности, принимающей участие в процессе окисления кислородом воздуха [8]. Поэтому для представленной пробы проведены лабораторные исследования химической активности угля по отношению к кислороду хроматографическим методом, основанным на адсорбционном механизме процесса разделения газа на твердом сорбенте.

Для того чтобы оценить изменение механических и физико-химических свойств угля в результате газодинамического явления, проведен сравнительный анализ пробы после выброса и не подвергнутой данному явлению. Все пробы угля отобраны из западной лавы пласта l_4 шахты «Комсомолец Донбасса», что позволяет анализировать полученные данные.

В результате лабораторных исследований определены дробимость угля и константы скорости окисления при различных температурах в диапазоне от 30 до 140 °С, рассчитаны значения критической температуры самовозгорания и энергии активации (см. таблицу).

Исследования процесса окисления углей Донбасса [8] позволили выявить следующую закономерность: с повышением химической активности углей, характеризуемой константой скорости окисления, увеличивается значение критической температуры самовозгорания. Значения $T_{кр}$ и $k_{кр}$ исследуемых проб угля представлены на рис. 1, из которого следует, что все пробы, кроме угля после выброса, подчиняются данной закономерности с коэффициентом аппроксимации 0,94. Низкое значение критической температуры самовозгорания первой пробы, выше которой скорость окисления возрастает

скачкообразно, свидетельствует об изменении химической активности угля, выброшенного в результате газодинамического явления, и возможности перехода процесса самонагрева в возгорание.

Физико-химические параметры угля

Номер пробы	Дробимость	Критическая температура самовозгорания $T_{кр}$, К	Константа скорости окисления $k_{кр} \cdot 10^9$, $\text{м}^3/(\text{моль} \cdot \text{с})$	Время удерживания кислорода τ_H , с	Внешняя реагирующая поверхность угля $S_{вн}$, $\text{м}^2/\text{кг}$
1 (после выброса)	27,1	332,4	6,403	77,2	579,7
2	8,4	363,1	0,729	46,9	282,4
3	8,0	379,9	4,155	35,4	169,3
4	8,9	370,2	2,745	33,4	200,3
5	6,9	355,7	0,420	50,2	294,7

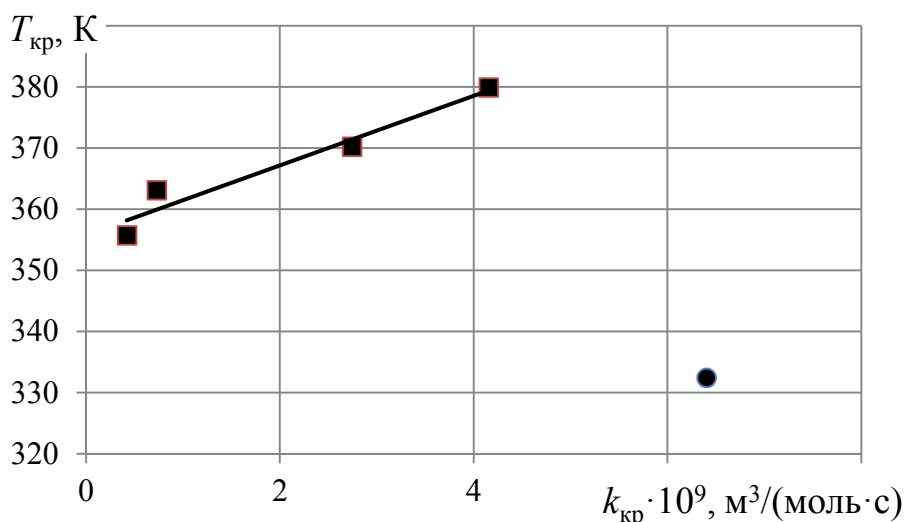


Рис. 1. Зависимость критической температуры самовозгорания угля от константы скорости окисления при этой температуре:

■ – пробы 2 – 6; ● – проба 1 (после выброса);

$$T_{кр} = 5,7 \cdot 10^9 k_{кр} + 355,7; r = 0,97$$

Рассмотрим хроматографическую систему, состоящую из колонки, которая заполнена сорбентом (углем), и протекающего через него газа-носителя с введенным адсорбтивом (кислородом). Количество кислорода, не вступающего во взаимодействие с углем, элюируется из колонки в виде хроматографического пика. Сила взаимодействия молекул кислорода с сорбентом характеризуется временем удерживания, которое тем больше, чем активнее протекает процесс сорбции. Так как лабораторные исследования проведены на одной и той же

насадочной колонке с соблюдением одинаковых условий хроматографирования, то значительное отличие времени удерживания кислорода при начальной температуре τ_n (см. таблицу) для угля после выброса можно объяснить изменением его химической структуры, способствующим протеканию сорбционных процессов. Кроме того, хроматограмма первой пробы по сравнению с остальными имеет более размытый задний фронт. Это может быть связано с появлением тупиковых пор в угле и, следовательно, изменением продольной и поперечной молекулярной диффузии газа в хроматографической колонке.

Известно, что процесс сорбции кислорода зависит от внешней реагирующей поверхности угля, которая связана с его дробимостью уравнением [8]

$$S_{\text{вн}} = \dot{S}_{\text{вн}} D_r, \quad (1)$$

где $S_{\text{вн}}$ – внешняя реагирующая поверхность угля, м²/кг;

$\dot{S}_{\text{вн}}$ – внешняя поверхность исследуемых в хроматографическом опыте частиц угля, м²/кг;

D_r – дробимость угля.

Параметр $\dot{S}_{\text{вн}}$ определен исходя из фракции и навески угля, загружаемого в хроматографическую колонку определенного объема.

Значение $S_{\text{вн}}$ для угля после выброса аналогично времени удерживания кислорода более чем в два раза превышает остальные (см. таблицу). Зависимость внешней реагирующей поверхности угля всех исследуемых проб от τ_n описывается полиномиальной функцией второго порядка с высоким коэффициентом аппроксимации, равным 0,99 (рис. 2).

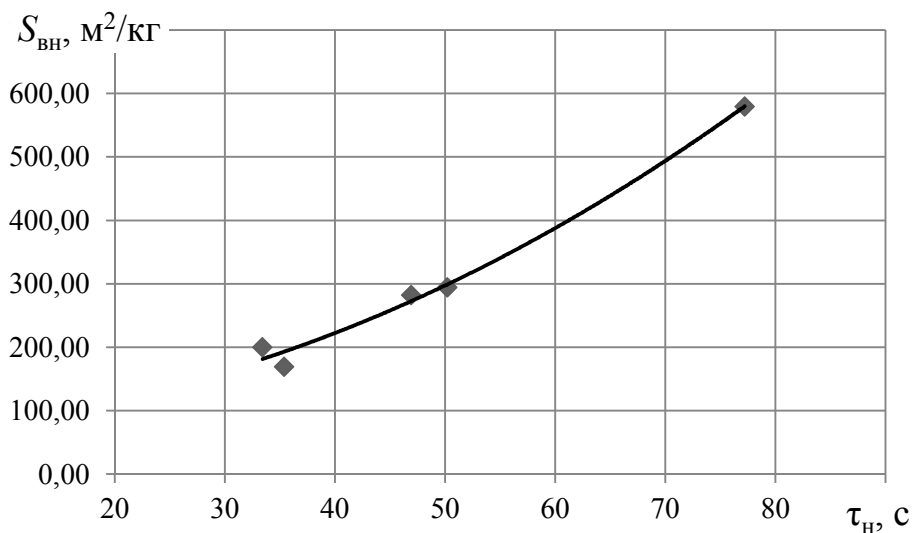


Рис. 2. Зависимость внешней реагирующей поверхности угля от времени удерживания кислорода:

$$y = 0,0775x^2 + 0,5159x + 77,694; R^2 = 0,9902$$

Таким образом, использование хроматографического метода с импульсным вводом кислорода позволяет исследовать протекание гетерогенных реакций окисления угля в зоне геологических нарушений.

Как отмечалось выше, выбросы угля сопровождаются его измельчением, которое может ускорить процесс самовозгорания. Установлено, что в пределах одной стадии метаморфизма увеличение хрупкости угля и, следовательно, внешней реагирующей поверхности угля повышает степень склонности его к самовозгоранию, один из основных показателей которого – критическая температура самовозгорания [8].

Для исследуемых проб до и после внезапного выброса установлена зависимость критической температуры самовозгорания угля от его внешней реагирующей поверхности (рис. 3). Высокое значение коэффициента аппроксимации (0,98) полиномиальной функции второго порядка позволяет прогнозировать критическую температуру самовозгорания угля на основании исследования химической активности с помощью хроматографического метода.

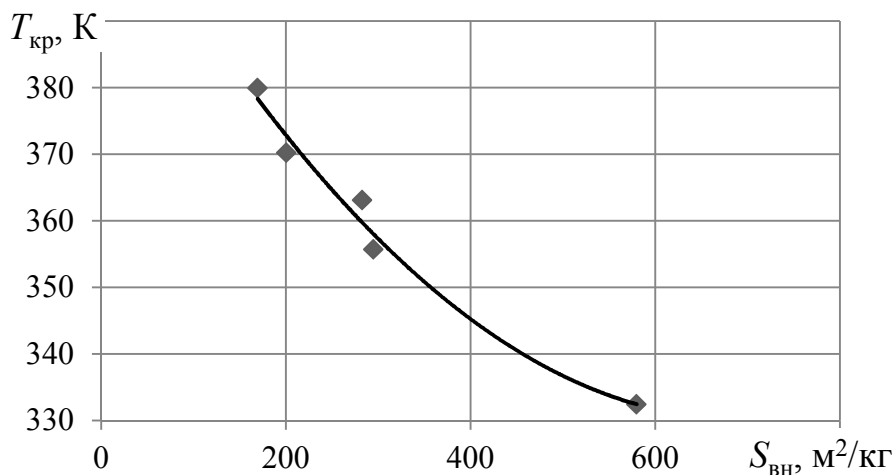


Рис. 3. Зависимость критической температуры самовозгорания угля от его внешней реагирующей поверхности:

$$y = 0,0002x^2 - 0,244x + 414,58; R^2 = 0,98$$

Дальнейшее исследование углей различной стадии метаморфизма в зоне геологических нарушений пласта позволит повысить достоверность полученных зависимостей и предупредить возникновение самовозгорания угля в случае газодинамического явления.

Выводы. Проведен сравнительный анализ сорбционных параметров проб угля, отобранного из ненарушенного пласта и выброшенного в результате газодинамического явления. Определена более низкая критическая температура самовозгорания угля и высокое значение константы скорости окисления при этой температуре, свидетельствующее об увеличении химической активности выброшенного угля. Показана положительная корреляция хроматографических

параметров гетерогенной реакции окисления с критической температурой самовозгорания угля. Установлено, что угли, не склонные к самовозгоранию, в зоне геологического нарушения газоносного пласта могут быть источником эндогенного пожара.

Список литературы / References

1. Король, В.И. Акустический способ прогноза газодинамических явлений в угольных шахтах: моногр. / В.И. Король, А.В. Скобенко. – Донецк: Национальный горный университет, 2013. – 181 с.

Korol', V.I., Skobenko, A.V. *Akusticheskiy sposob prognoza gazodinamicheskikh yavleniy v ugol'nykh shakhtakh: monogr.* [Acoustic method of gas-dynamic phenomena prediction in coal mines: monograph]. Dnepropetrovsk, Natsional'nyu gornuyu universitet Press, 2013, 181 p.

2. Опарин, В.Н. Геомеханические и физико-химические процессы, определяющие выбросо- и пожароопасность угольных пластов Кузбасса / В.Н. Опарин, Т.А. Киряева // Вестник инженерной школы ДВФУ. – 2014. – № 3(20). – С. 69 – 87.

Oparin, V.N., Kiryayeva, T.A. *Geomekhanicheskiye i fiziko-khimicheskiye protsessy, opredelyayushchiye vybroso- i pozharoopasnost' ugol'nykh plastov Kuzbassa* [Geomechanical and physicochemical processes defining the outburst and fire hazard of coal strata of the Kuznetsk Basin]. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU* [The Far Eastern Federal University: School of Engineering Bulletin], 2014, no. 3(20), pp. 69 – 87.

3. Малинникова, О.Н. Условия формирования и методология прогнозирования газодинамических явлений при техногенном воздействии на угольные пласты: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 25.00.20 / УРАН ИПКОН РАН. – М., 2011. – 47 с.

Malinnikova, O.N. *Usloviya formirovaniya i metodologiya prognozirovaniya gazodinamicheskikh yavleniy pri tekhnogennom vozdeystvii na ugol'nyye plasty: avtoref. dis. ... d-ra tekhn. nauk: 25.00.20/ URAN IPKON RAN* [Conditions of formation and methodology of gas-dynamic phenomena prediction during the man-caused influence on coal strata: author's abstract of dr. tech. sci. diss.: 25.00.20/ Institute of Complex Mineral Resources Exploitation Problems of the Russian Academy of Sciences]. Moscow, 2011, 47 p.

4. Булат, А.Ф. Некоторые проблемы газодинамических явлений в угольном массиве в контексте нелинейной неравновесной термодинамики / А.Ф. Булат, В.И. Дырда // Геотехнічна механіка: сб. наук. пр. – 2013. – Вип. 108. – С. 3 – 31.

Bulat, A.F., Dyrda, V.I. *Nekotoryye problemy gazodinamicheskikh yavleniy v ugol'nom massive v kontekste nelineynoy neravnovesnoy termodinamiki* [Some problems of gas-dynamic phenomena in a coal massif within the context of the non-linear non-equilibrium thermodynamics]. *Geotekhnichna mekhanika: sb. nauk. pr.*

[Geotechnical-and-engineering mechanics: collection of scientific works]. 2013, issue 108, pp. 3 – 31.

5. Радченко, С.А. Сорбционные и газокинетические свойства угля и углесодержащих пород, возможности их использования для улучшения прогноза выделения метана / С.А. Радченко // Горный информационно-аналитический бюллетень: науч.-техн. журн. – 2013. – № 9. – С. 247 – 256.

Radchenko, S.A. *Sorbtsionnyye i gazokineticheskiye svoystva ugl'a i uglesoderzhashchikh porod, vozmozhnosti ikh ispol'zovaniya dlya uluchsheniya prognoza vydeleniya metana* [Sorptions and gas-kinetic properties of coal and coal-bearing rock, possibilities of their use for improvement of the methane release prediction]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten': nauch.-tekhn. zhurn.* – *Mining information and analytical bulletin: scientific technical journal*, 2013, no. 9, pp. 274 – 256.

6. Ярош, А.С. Моделирование процесса эндогенного пожара, осложненного взрывом метана, в нормированных параметрах горной выработки / А.С. Ярош // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности: науч.-техн. журн. – Кемерово, 2019. – № 3. – С. 29 – 36.

Yarosh, A.S. *Modelirovaniye protsessa endogennoy pozhara, oslozhnyennogo vzyvrom metana, v normirovannykh parametrah gornoy vyrabotki* [Modeling of the spontaneous fire process complicated by a methane explosion in standardized parameters of a mine working]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti: nauch.-tekhn. zhurn.* – *Bulletin of Research Center for Safety in Coal Industry (Industrial Safety): scientific-technical magazine*, Kemerovo, 2019, no. 3, pp. 29 – 36.

7. Ульянова, Е.В. Влияние газодинамического явления на сорбционные свойства угля шахты «Краснолиманская» / Е.В. Ульянова, В.А. Васильковский, О.Н. Малинникова // Горный информационно-аналитический бюллетень: науч.-техн. журн. – 2018. – № 11. – С. 46 – 55.

Ul'yanova, Ye.V., Vasil'kovskiy, V.A., Malinnikova, O.N. *Vliyaniye gazodinamicheskogo yavleniya na sorbtsionnyye svoystva ugl'ya shakhty "Krasnolimanskaya"* [Influence of a gas-dynamic phenomenon on sorption properties of the "Krasnolimanskaya" mine coal]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten': nauch.-tekhn. zhurn.* – *Mining information and analytical bulletin: scientific-technical journal*, 2018, no. 11, pp. 46 – 55.

8. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж (Донецкое отделение), 2013. – 792 с.

Pashkovskiy, P.S. *Endogennyye pozhary v ugol'nykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ. (Donetsk branch), 2013, 792 p.

Viktoriya Petrovna Orlikova, scientific associate; e-mail: v.orlikova.69@gmail.com

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-81

PHYSICOCHEMICAL PROPERTIES OF COAL DURING ITS SUDDEN OUTBURSTS

Purpose. Study of the chemical activity of coal thrown out from the gas-dynamic phenomenon zone.

Methodology. Laboratory and analytical investigations of coal sorption characteristics and indices of coal liability to spontaneous combustion with the help of the chromatography method.

Results. The application of the gas chromatography has made it possible to conduct the comparison analysis of the oxygen retention time in coal pores and its outer reactive surface for the samples taken from a virgin stratum and thrown out as a result of the gas-dynamic phenomenon.

The critical temperature of the coal spontaneous combustion has been determined, and its high correlation with the sorption parameters of the heterogeneous oxidation reaction of the investigated samples has been demonstrated. The lower critical temperature of the coal spontaneous combustion and the high value of the oxidation velocity constant at this temperature have been established being the evidence of the increase in the chemical activity of the thrown out coal.

Scientific novelty. Investigation of the gas-dynamic phenomenon influence on the change of the coal physicochemical properties with the help of the gas chromatography method.

Practical value. The investigations of coal in the zone of the seam stratum geological disturbances make it possible to prevent the occurrence of the coal spontaneous combustion in this zone and to improve the occupational safety at the coal-mining enterprises.

Keywords: *outer reactive surface; critical temperature of the spontaneous combustion; retention time; coal; outburst; gas-dynamic phenomenon.*

УДК [543.544:547.21–022.532]:614.841.2

Алексей Андреевич Козлитин, нач. отд.; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;

Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-55

ПАРАМЕТРЫ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО ОБНАРУЖЕНИЯ БЕНЗИНА И КЕРОСИНА ВО ФРАГМЕНТАХ ГОРЕВШИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Выбор оптимальных условий газохроматографического обнаружения и идентификации следовых количеств бензина и керосина в пробах, отобранных с места пожара, на полярном и неполярном сорбенте.

Методы. Экспериментальные исследования с применением методов газохроматографического анализа и аккумулятивной хроматографии сложных углеводородных смесей (бензин и керосин). Статистическая обработка экспериментальных данных.

Результаты. Приведены результаты экспериментальных исследований эффективного разделения смеси предельных углеводородов нормального и изомерного строения: 3-метилгексана, гептана, 3-метилгептана и октана на полярном сорбенте, а также сложных углеводородных смесей – бензина и керосина на неполярном сорбенте при разных линейных скоростях газового потока. По результатам исследований произведена статистическая обработка и математический расчет высот, эквивалентных теоретической тарелке, коэффициентов А, В и С уравнения Ван-Деемтера и площадей групповых пиков бензина и керосина. Установлена оптимальная линейная скорость газового потока для эффективного и селективного формирования группового пика предельных углеводородов и отделения его от индивидуальных пиков ароматических углеводородов сложных смесей – бензина и керосина.

Научная новизна. Впервые изучено влияние скорости газового потока на эффективность разделения смеси предельных углеводородов нормального и изомерного строения – ключевых компонентов нефтепродуктов, а также разделения группы предельных углеводородов от ароматических углеводородов бензина и керосина методом аккумулятивной хроматографии.

Практическая значимость. Настоящее исследование позволило сделать вывод о том, что для достижения эффективности и селективности группового разделения сложных смесей (бензин и керосин) методом аккумулятивной хроматографии оптимальная линейная скорость газового потока находится в пределах от 12,8 до 16,3 см/с и главным образом зависит от свойств сорбента. Показано, что кинетическая теория дает основу для оптимизации хроматографического процесса обнаружения следовых количеств исследуемых веществ. Высокая чувствительность метода аккумулятивной хроматографии (ниже 10^{-9} г/см³) позволила исключить дополнительные стадии подготовки проб – экстракцию и концентрирование, с которыми связано наибольшее количество возможных погрешностей, искажающих результаты анализа и последующей идентификации инициаторов горения при проведении пожарных исследований фрагментов материалов, изъятых с места пожара.

Ключевые слова: аккумулятивная хроматография; бензин; время выхода; групповой пик; керосин; линейная скорость; объемная скорость; оптимизация.

Постановка проблемы. Один из основных признаков поджога – обнаружение на месте пожара остатков веществ, которые могли быть использованы как средства поджога. Чаще всего в качестве средств поджога используют бензин и керосин – сложные смеси органических соединений,

состоящие в основном из алифатических и ароматических углеводородов. Всестороннее развитие в современной методологии пожарно-технических исследований сложных смесей органических веществ получили инструментальные методы анализа, которые направлены на снижение порогов обнаружения остатков инициаторов горения на различных предметах-носителях.

При этом выбор оптимальных условий анализа в газовой хроматографии при разработке новых методик – достаточно сложная задача, так как необходимо учесть большое количество факторов, которые часто зависят друг от друга. Решение конкретной аналитической задачи включает выбор варианта газовой хроматографии, основанного на данных о физико-химических свойствах разделяемых компонентов смеси и свойствах жидкой фазы (полярность и селективность), и последующую оптимизацию условий разделений: скорости газа-носителя, температуры нагревания колонки, объема вводимой в хроматограф пробы и т.д.

Анализ последних исследований. Газовая хроматография относится к наиболее часто используемым методам решения специфических задач в практике пожарно-технических исследований и по прогрессу научных исследований, количеству публикаций [1–3] занимает лидирующие позиции в современном химическом анализе.

Метод газовой хроматографии привлекает исследователей новыми возможностями разделения смесей, которые оказались полезными при анализе сложных многокомпонентных инициаторов горения нефтяной природы (бензин, керосин, дизельное топливо, нефтяные растворители и др.). Однако, несмотря на значительный прогресс в области применения газохроматографических методов в пожарно-технических исследованиях, вопрос выбора оптимальных условий разделения многокомпонентных смесей и при этом достижения низких порогов обнаружения следовых количеств инициаторов горения (на уровне 10^{-9} г/см³ и ниже) остается не решенным окончательно.

Цель настоящей работы заключается в оптимизации по линейной скорости газового потока условий обнаружения следовых количеств бензина и керосина в пробах, отобранных с места пожара.

Изложение основного материала. Чаще всего для оптимизации разделения применяют кинетическую теорию хроматографии, которая основана на скорости продвижения вещества в колонке и определяется соотношением времени, проводимого молекулой в подвижной и неподвижной фазе.

На продвижение частиц влияет ряд факторов, искажающих форму пика (делающих их несимметричными) и снижающих эффективность колонки, а именно: размеры гранул сорбента, их однородность, плотность и равномерность заполнения колонки, скорость установления равновесия процессов сорбции-десорбции (массовый обмен), диффузия молекул из зоны

с большей концентрацией в зону с меньшей концентрацией. Влияние этих факторов на эффективность колонки учитывается фундаментальным уравнением Ван-Деемтера и может быть проверено независимыми экспериментами.

В хроматографии эффективность колонки измеряется числом теоретических тарелок n и высотой, эквивалентной теоретической тарелке H . Значения высот, эквивалентных теоретической тарелке H , полученные по результатам экспериментальных исследований с применением метода аккумулятивной газовой хроматографии при разных линейных скоростях газового потока, рассчитывали по уравнению

$$H = 0,181L(\Delta l / l_r)^2, \quad (1)$$

где H – высота, эквивалентная теоретической тарелке, см;

L – длина хроматографической колонки, см;

Δl – ширина пика, измеренная на его высоте $h = 0,5h_{max}$, см;

l_r – расстояние на диаграммной ленте, соответствующее времени выхода анализируемого вещества, см.

Для нахождения корреляционной связи между высотой, эквивалентной теоретической тарелке, и линейной скоростью газа-носителя использовали классическое уравнение Ван-Деемтера

$$H = A + B/\alpha + C\alpha, \quad (2)$$

где α – линейная скорость газового потока, см/с;

A , B и C – коэффициенты уравнения Ван-Деемтера.

Заметим, что каждый член уравнения (2) описывает вклад определенного процесса в размывание выходной кривой. Коэффициент A определяет область вихревой диффузии, которая зависит от размера частиц сорбента и плотности заполнения хроматографической колонки и не зависит от линейной скорости газового потока. Второе слагаемое уравнения Ван-Деемтера B/α характеризует размывание хроматографической полосы за счет молекулярной диффузии (область малых значений линейной скорости газового потока), третий член уравнения (2) $C\alpha$ определяет область диффузии хроматографируемого вещества за счет кинетики процесса сорбции (кинетика внутренней массопередачи).

В табл. 1 представлены значения высот, эквивалентных теоретической тарелке H , которые получены при разных линейных скоростях газового потока, а также данные промежуточных расчетов для нахождения коэффициентов A , B и C уравнения Ван-Деемтера при хроматографическом исследовании

следующих предельных углеводородов – основных компонентов бензина и керосина: 3-метилгексана, гептана, 3-метилгептана и октана.

Таблица 1

Экспериментальные данные и результаты промежуточных вычислений
для определения коэффициентов уравнения Ван-Деемтера

Высота, эквивалентная теоретической тарелке H , см	Линейная скорость газового потока α , см/с	$1/\alpha$	$1/\alpha^2$	α^2	$H\alpha$	H/α
3-метилгексан						
2,91	21,24	0,047081	0,002217	451,1376	61,8084	0,137006
3,19	15,92	0,062814	0,003946	253,4464	50,7848	0,200377
1,96	12,73	0,078555	0,006171	162,0529	24,9508	0,153967
1,71	10,51	0,095147	0,009053	110,4601	17,9721	0,162702
$\Sigma H = 9,77$	$\Sigma \alpha = 60,4$	$\Sigma (1/\alpha) = 0,283597$	$\Sigma (1/\alpha^2) = 0,021386$	$\Sigma \alpha^2 = 977,097$	$\Sigma H\alpha = 155,5161$	$\Sigma (H/\alpha) = 0,654052$
Гептан						
3,39	21,24	0,047081	0,002217	451,1376	72,0036	0,159605
2,32	15,92	0,062814	0,003946	253,4464	36,9344	0,145729
3,21	12,73	0,078555	0,006171	162,0529	40,8633	0,25216
2,56	10,51	0,095147	0,009053	110,4601	26,9056	0,243578
$\Sigma H = 11,48$	$\Sigma \alpha = 60,4$	$\Sigma (1/\alpha) = 0,283597$	$\Sigma (1/\alpha^2) = 0,021386$	$\Sigma \alpha^2 = 977,097$	$\Sigma H\alpha = 176,7069$	$\Sigma (H/\alpha) = 0,80107$
3-метилгептан						
2,37	21,24	0,047081	0,002217	451,1376	50,3388	0,111582
1,97	15,92	0,062814	0,003946	253,4464	31,3624	0,123744
2,54	12,73	0,078555	0,006171	162,0529	32,3342	0,199529
1,88	10,51	0,095147	0,009053	110,4601	19,7588	0,178877
$\Sigma H = 9,77$	$\Sigma \alpha = 60,4$	$\Sigma (1/\alpha) = 0,283597$	$\Sigma (1/\alpha^2) = 0,021386$	$\Sigma \alpha^2 = 977,097$	$\Sigma H\alpha = 133,7942$	$\Sigma (H/\alpha) = 0,654052$
Октан						
2,91	21,24	0,047081	0,002217	451,1376	61,8084	0,137006
2,32	15,92	0,062814	0,003946	253,4464	36,9344	0,145729
2,00	12,73	0,078555	0,006171	162,0529	25,46	0,157109
1,64	10,51	0,095147	0,009053	110,4601	17,2364	0,156042
$\Sigma H = 8,87$	$\Sigma \alpha = 60,4$	$\Sigma (1/\alpha) = 0,283597$	$\Sigma (1/\alpha^2) = 0,021386$	$\Sigma \alpha^2 = 977,097$	$\Sigma H\alpha = 141,4392$	$\Sigma (H/\alpha) = 0,595885$

Коэффициенты уравнения Ван-Деемтера A , B и C находили, решая следующую систему уравнений с тремя неизвестными:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Sigma H = A + B \Sigma 1/\alpha + C \Sigma \alpha; \\ \Sigma H/\alpha = A \Sigma 1/\alpha + B \Sigma 1/\alpha^2 + C; \\ \Sigma H\alpha = A \Sigma \alpha + B + C \Sigma \alpha^2. \end{array} \right. \quad (3)$$

Для проведения расчетов коэффициентов уравнения Ван-Деемтера A , B и C реализовали процедуру вычислений с помощью компьютерной программы Microsoft Excel на персональном компьютере. Для этого суммарные значения $1/\alpha$, $1/\alpha^2$, α^2 , H/α , $H\alpha$ подставили в систему уравнений (3) и после ее решения получили значения коэффициентов A , B и C уравнения (2), которые представлены в табл. 2. В этой же таблице приведены значения оптимальной линейной скорости газового потока $\alpha_{\text{опт}}$ для 3-метилгексана, гептана, 3-метилгептана и октана, вычисленные по формуле

$$\alpha_{\text{опт}} = \sqrt{B/C}. \quad (4)$$

Таблица 2

Результаты определения коэффициентов уравнения Ван-Деемтера и оптимальной линейной скорости потока газа-носителя

Определяемый параметр	Компонент			
	3-метилгексан	гептан	3-метилгептан	октан
A	1,01636	1,20377	0,91348	0,92960
B	13,23402	17,34787	13,46625	12,03005
C	0,08279	0,08868	0,06668	0,07498
$\alpha_{\text{опт}}$, см/с	12,64321	13,98634	14,21092	12,66673

Анализ данных табл. 2 показывает, что значения коэффициентов уравнения Ван-Деемтера, а также оптимальная линейная скорость потока газа-носителя, рассчитанные для предельных углеводородов: 3-метилгексана, гептана, 3-метилгептана и октана, – практически близки между собой. Таким образом, кинетическая теория дает основу для оптимизации условий хроматографического процесса обнаружения следовых количеств исследуемых веществ: бензина и керосина. Аналогичным образом были обработаны данные аккумулятивной хроматографии керосина и бензина, представленные в табл. 3.

Расчет числа теоретических тарелок n , высоты, эквивалентной теоретической тарелке H , и площади группового пика S керосина и бензина проводили по ширине группового пика предельных углеводородов, измеренной в основании и на половине высоты группового пика. Анализ данных показал,

что значения площадей групповых пиков керосина и бензина в зависимости от линейной скорости потока газа-носителя отличаются.

Таблица 3

Экспериментальные данные и результаты промежуточных вычислений данных аккумулятивной хроматографии керосина и бензина

Линейная скорость газового потока α , см/с	Время выхода группового пика τ_r , с	Ширина группового пика, с		Число теоретических тарелок n		Высота, эквивалентная теоретической тарелке H , см		Высота группового пика h , с	Площадь группового пика S , см ²	
		в основании ω	на половине высоты $\omega_{0,5}$	в основании ω	на половине высоты $\omega_{0,5}$	в основании ω	на половине высоты $\omega_{0,5}$		в основании ω	на половине высоты $\omega_{0,5}$
Керосин										
10,51	43,5	51,2	18,8	11,5	29,66	25,97	10,11	10,1	323,2	201,7
15,92	32,0	29,6	11,6	18,7	42,16	16,04	7,12	17,7	327,5	218,1
18,47	29,0	34,0	14,8	11,6	21,27	25,77	14,10	9,8	208,3	154,1
21,34	27,0	35,2	15,2	9,4	17,48	31,87	17,16	10,0	220,0	161,4
Бензин										
10,51	67,0	10,0	6,8	718,2	537,8	0,418	0,558	3,1	19,5	22,5
13,38	57,0	9,6	6,8	564,1	389,3	0,532	0,771	2,5	15,3	18,4
15,92	51,0	10,0	7,2	416,2	278,0	0,721	1,079	4,9	30,6	37,5
18,47	45,5	9,6	6,8	359,4	248,0	0,835	1,209	3,2	19,2	23,1
21,34	42,0	10,4	6,4	260,9	238,6	1,150	1,257	5,8	37,7	39,4

В табл. 4 представлены значения высоты, эквивалентной теоретической тарелке H , полученные при разных линейных скоростях газового потока, а также данные промежуточных расчетов для нахождения коэффициентов A , B и C уравнения Ван-Деемтера при хроматографическом исследовании керосина и бензина.

Расчет высоты, эквивалентной теоретической тарелке H , был сделан на основе ширины в основании группового пика бензина и керосина и на половине его высоты для различных значений линейной скорости потока газа-носителя.

Для проведения расчета коэффициентов уравнения Ван-Деемтера A , B и C реализовали процедуру вычислений в Microsoft Excel на персональном компьютере. Для этого суммарные значения $1/\alpha$, $1/\alpha^2$, α^2 , H/α , H/α^2 (табл. 4) подставили в систему уравнений (3) и после ее решения получили значения коэффициентов уравнения (2), которые представлены в табл. 5. В табл. 5

приведены также значения оптимальной скорости газового потока $\alpha_{\text{опт}}$, которые вычислены по формуле (4).

Таблица 4

Экспериментальные данные и результаты промежуточных вычислений для определения коэффициентов уравнения Ван-Деемтера

Высота, эквивалентная теоретической тарелке Н, см	Линейная скорость газового потока α , см/с	$1/\alpha$	$1/\alpha^2$	α^2	$H \alpha$	H/α
Расчет на основе ширины группового пика керосина, измеренной на половине его высоты						
10,1146	10,51	0,095147	0,009053	110,4601	106,3044	0,962379
7,115862	15,92	0,062814	0,003946	253,4464	113,2845	0,446976
14,10389	18,47	0,054142	0,002931	341,1409	260,4989	0,763611
17,16213	21,34	0,04686	0,002196	455,3956	366,2398	0,804223
$\Sigma H = 48,49648$	$\Sigma \alpha = 66,24$	$\Sigma (1/\alpha) = 0,258964$	$\Sigma (1/\alpha^2) = 0,018126$	$\Sigma \alpha^2 = 1160,443$	$\Sigma H \alpha = 846,3276$	$\Sigma (H/\alpha) = 2,977189$
Расчет на основе ширины группового пика керосина, измеренной в основании						
25,975426	10,51	0,095147	0,009053	110,4601	273,0017	2,471496
16,042969	15,92	0,062814	0,003946	253,4464	255,4041	1,007724
25,772889	18,47	0,054142	0,002931	341,1409	296,3136	0,868596
31,868313	21,34	0,04686	0,002196	455,3956	549,9935	1,207727
$\Sigma H = 99,659597$	$\Sigma \alpha = 66,24$	$\Sigma (1/\alpha) = 0,258964$	$\Sigma (1/\alpha^2) = 0,018126$	$\Sigma \alpha^2 = 1160,443$	$\Sigma H \alpha = 1374,713$	$\Sigma (H/\alpha) = 5,555543$
Расчет на основе ширины группового пика бензина, измеренной на половине его высоты						
0,557802	10,51	0,095147	0,009053	110,4601	5,862494	0,053073
0,77069	13,38	0,074738	0,005586	179,0244	10,31183	0,0576
1,079285	15,92	0,062814	0,003946	253,4464	17,18222	0,067794
1,209502	18,47	0,054142	0,002931	341,1409	22,3395	0,065485
1,257398	21,34	0,04686	0,002196	455,3956	26,83288	0,058922
$\Sigma H = 4,874676$	$\Sigma \alpha = 79,62$	$\Sigma (1/\alpha) = 0,333702$	$\Sigma (1/\alpha^2) = 0,021386$	$\Sigma \alpha^2 = 1339,467$	$\Sigma H \alpha = 82,52892$	$\Sigma (H/\alpha) = 0,302875$
Расчет на основе ширины группового пика бензина, измеренной в основании						
0,417688	10,51	0,095147	0,009053	110,4601	4,389898	0,039742
0,531856	13,38	0,074738	0,005586	179,0244	7,116233	0,03975
0,720877	15,92	0,062814	0,003946	253,4464	11,47636	0,045281
0,41879	18,47	0,054142	0,002931	341,1409	7,735051	0,022674
1,14966	21,34	0,04686	0,002196	455,3956	24,53374	0,053873
$\Sigma H = 3,23887$	$\Sigma \alpha = 79,62$	$\Sigma (1/\alpha) = 0,333702$	$\Sigma (1/\alpha^2) = 0,021386$	$\Sigma \alpha^2 = 1339,467$	$\Sigma H \alpha = 55,25128$	$\Sigma (H/\alpha) = 0,201321$

Таблица 5

Результаты определения коэффициентов уравнения Ван-Деемтера
и значения оптимальной скорости газового потока

Определяе- мый параметр	Вещество			
	бензин		керосин	
	ширина основания группового пика	половина высоты группового пика	ширина основания группового пика	половина высоты группового пика
A	0,279250	0,415552	5,819579	5,07587
B	3,635282	5,542822	185,1253	70,84901
C	0,021936	0,032774	0,692924	0,378522
$\alpha_{\text{опт}}$, см/с	12,87341	13,00470	16,34519	13,68111

Анализ данных табл. 5 показывает, что коэффициент С уравнения Ван-Деемтера, который определен по ширине основания группового пика бензина (0,02) и половине его высоты (0,03), практически имеет близкие значения.

Это обстоятельство позволяет сделать вывод, что групповое разделение предельных углеводородов от ароматических углеводородов бензина происходит в основном за счет кинетики сорбции, т.е. процесса внутренней массопердачи. Оптимальная в отношении эффективности группового разделения предельных и ароматических углеводородов бензина линейная скорость газового потока, которую определяли по ширине основания группового пика и половине его высоты, одинакова и равна примерно 13 см/с.

Для керосина при формировании группового пика предельных углеводородов и отделении его от индивидуальных пиков ароматических углеводородов оптимальная линейная скорость газового потока отличается в обоих случаях: 16,3 (расчет по ширине основания группового пика) и 13,7 м/с (расчет на половине высоты группового пика). Для керосина наиболее близкими по значению оказались коэффициенты А уравнения Ван-Деемтера, которые определяют область вихревой диффузии и не зависят от линейной скорости газового потока.

Выводы. Установлены численные значения оптимальной скорости газа-носителя, оценены вклады каждого из процессов, описываемых коэффициентами А, В и С уравнения Ван-Деемтера в высоту, эквивалентную теоретической тарелке. Показано, что, изменяя значение скорости потока газа-носителя, можно изменять эти вклады. Данное исследование позволило сделать вывод о том, что для достижения эффективности и селективности группового разделения сложных смесей (бензин и керосин) методом аккумулятивной хроматографии оптимальная линейная скорость потока газа-носителя находится в пределах 12,8...16,3 см/с, и главным образом зависит от свойств сорбента.

Показано, что кинетическая теория дает основу для оптимизации хроматографического процесса обнаружения следовых количеств исследуемых веществ.

Список литературы / References

1. Мартынов, В.Ф. Разработка способа фракционного разделения нефти для решения задач диагностики и идентификации загрязнений / В.Ф. Мартынов, Ю.Н. Бельшина // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – № 1(25). – С. 7 – 11.

Martynov, V.F., Bel'shina, Yu.N. *Razrabotka sposoba fraktsionnogo razdeleniya nefi i identifikatsiya zagryazneniy* [Development of a method for fraction separation of oil and identification of pollutions contaminations]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of technosphere risk management*, 2013, no. 1(25), pp. 7 – 11.

2. Установление индивидуальных характеристик состава нефтепродуктов методами системного анализа / П.Н. Егориков, Ю.Н. Бельшина, С.В. Шараров, М.И. Архипов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – № 1. – С. 23 – 32.

Yegorikov, P.N., Bel'shina, Yu.N., Shararov, S.V., Arkhipov, M.I. *Ustanovleniye individual'nykh kharakteristik sostava nefteproduktov metodami sistemnogo analiza* [Determination of individual characteristics of petrochemical products composition by system analysis methods]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of technosphere risk management*, 2013, no. 1, pp. 23 – 32.

3. Гусев, К.Г. Использование высокоэффективной жидкостной хроматографии для идентификации нефтяных загрязнений / К.Г. Гусев, Э.А. Ожегов, В.А. Ловчиков // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – 2013. – № 4. – С. 61 – 67.

Gusev, K.G., Ozhegov, E.A., Lovchikov, V.A. *Ispol'zovaniye vysokoeffektivnoy zhidkostnoy khromatografii dlya identifikatsii neftyanykh zagryazneniy* [Application of high performance liquid chromatography for identification of oil pollutions]. *Nadzornaya deyatel'nost' i sudebnaya ekspertiza v sisteme bezopasnosti – Supervision activity and forensic inquiry in the system of security*, 2013, no. 4, pp. 61 – 67.

Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;
Viktoria Valentinovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-55

PARAMETERS OF BENZINE AND KEROSENE CHROMATOGRAPHIC DETECTION IN FRAGMENTS OF BURNT MATERIALS

Purpose. Selection of the optimum conditions of the gas chromatographic detection and identification of the trace quantities of benzine and kerosene in the samples taken from the place of fire on a polar and non-polar sorbent.

Methods. Experimental investigations with application of gas chromatographic analysis and accumulative gas chromatography methods of complex hydrocarbon mixtures (benzine and kerosene). Statistical processing of the experimental data.

Results. The results of the experimental investigations of the effective separation of the mixture of saturated hydrocarbons of normal and isomeric structure have been presented: 3-methylhexane, heptane, 3-methylheptane and octane on the polar sorbent as well as the complex hydrocarbon mixtures – benzine and kerosene on the non-polar sorbent with different linear velocities of a gas flow.

According to the investigation results the statistical processing and mathematical calculation of the heights equivalent to the theoretical plate, the A, B and C coefficients of the Van-Deemter equation and the areas of the benzene and kerosene group peaks have been conducted.

The optimum linear velocity of the gas flow has been established for effective and selective formation of the group peak of the saturated hydrocarbons and its separation from the individual peaks of the aromatic hydrocarbons of the complex mixtures, i.e. benzine and kerosene.

Scientific novelty. For the first time ever the influence of the gas flow velocity on the efficiency of the separation of the saturated hydrocarbons mixture of normal and isomeric structure, i.e. the key components of oil products, as well as on the separation of the saturated hydrocarbons group from the aromatic hydrocarbons of benzine and kerosene by the accumulative chromatography method has been studied.

Practical value. The current investigation has made it possible to conclude that for obtaining the efficiency and selectivity of the group separation of the complex mixtures (benzine and kerosene) by the accumulative chromatography method the optimum linear velocity of the gas flow stays within the margins from 12.8 up to 16.3 cm/s and essentially depends on the sorbent properties. It has been demonstrated that the kinetic theory provides a ground for optimization of the chromatographic process to detect the trace quantities of the substances under investigation. The high sensitivity of the accumulative chromatography method (below 10^{-9} g/cm³) has made it possible to exclude the additional stages of the sample preparation, i.e. extraction and concentration, both are linked to the highest number of probable errors corrupting the results of the analysis and further identification of accelerants during the fire investigations of material fragments extracted from the place of fire.

Keywords: *accumulative chromatography; benzine; exit time; group peak; kerosene; linear velocity; volume velocity; optimization.*

УДК 543.544.3:543.53

Алексей Андреевич Козлитин, нач. отд.; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;

Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru;

Игорь Николаевич Непочатых, науч. сотр.; e-mail: tamdoka@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-55*

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ ИНИЦИАТОРОВ ГОРЕНИЯ ВО ФРАГМЕНТАХ ГОРЕВШИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Разработка методики обнаружения остатков легковоспламеняющихся жидкостей – средств совершения поджогов в материалах, изъятых с места пожара.

Методы. Извлечение остатков легковоспламеняющихся жидкостей из ткани, грунта, древесины методом десорбции. Исследования газообразных проб методами аккумулятивной и газожидкостной хроматографии. Математическая обработка данных и оценка значений показателей точности измерений.

Результаты. Разработаны сорбенты для рабочих и контрольных насадочных колонок, комплексная методика извлечения и обнаружения следов ацетона, этилацетата, бензола и толуола – основных компонентов легковоспламеняющихся жидкостей методом газожидкостной хроматографии, а также бензина и керосина – методом аккумулятивной хроматографии во фрагментах горевших материалов. Определены времена выхода индивидуальных пиков компонентов легковоспламеняющихся жидкостей, а также групповых пиков бензина и керосина. Дана оценка значений показателей точности измерений, рассчитаны расширенная неопределенность и пределы допускаемой относительной погрешности измерений.

Научная новизна. Разработана методика извлечения из объектов-носителей различной природы (ткань, грунт, древесина) остатков легковоспламеняющихся жидкостей и газохроматографического обнаружения их ключевых компонентов, а также обнаружения бензина и керосина в материалах, изымаемых с места пожара.

Практическая значимость. Главная отличительная особенность методики – сочетание низкого порога обнаружения, на уровне наноконцентраций (ниже 10^{-9} г/см³), с экспрессностью (затраты времени на анализ одной пробы – около 5 мин) и простотой исполнения. Высокая чувствительность позволила исключить экстракцию и концентрирование проб. Область применения методики – пожарно-технические исследования фрагментов, изъятых с места пожара, для установления причин возникновения пожаров, связанных с поджогами.

Ключевые слова: *газовая хроматография; инициатор горения; легковоспламеняющаяся жидкость; метод обнаружения; пожарно-технические исследования; порог обнаружения.*

Постановка проблемы. Современный этап развития технологий нефтехимической, химической, лакокрасочной промышленности характеризует применение все большего количества новых видов сырья, различных функциональных ингредиентов и технологических добавок, относящихся к категории легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, которые могут быть использованы в качестве средств совершения поджога. Это вызывает необходимость разработки новых, более чувствительных, методов обнаружения и дальнейшей идентификации легковоспламеняющихся жидкостей во фрагментах материалов, изъятых с места пожара, для эффективного расследования причин возникновения пожаров, связанных с поджогами.

Для того чтобы пожарно-техническое исследование оказалось результативным, необходимо наличие лабораторной приборной базы и аналитических методик, с помощью которых решаются отдельные конкретные задачи пожарно-технических исследований. Исследование фрагментов после пожара сводится к выявлению специфических признаков и свойств объектов, их описанию, сравнению и выполнению других необходимых действий. При этом применяются высокочувствительные методы анализа, обеспечивающие наиболее полное, всестороннее и результативное исследование.

В качестве лабораторных методов в пожарно-технических исследованиях используют методы стандартных испытаний, которые утверждены национальными или международными стандартами, а также инструментальные методы, например инфракрасная и флуоресцентная спектроскопии, методы термического анализа, газовая и тонкослойная хроматографии и др.

Для определения пожароопасных характеристик исследуемых веществ и материалов, таких как группа горючести, кислородный индекс, температура вспышки, воспламенения, самовоспламенения, тления, используют стандартные методы. В этом случае методика проведения пожарных исследований, в том числе подготовки образцов (количество, размеры, условия кондиционирования), должна полностью соответствовать требованиям нормативного документа.

Исследования вещественных доказательств, изъятых с места пожара – обгоревших фрагментов ткани, древесины, строительных материалов, пожарного мусора, содержащих остатки легковоспламеняющихся и горючих жидкостей в ультрамалых количествах – на уровне пикоконцентраций (10^{-12} г/см³), выполняют в соответствии со специальными методиками, разработанными лабораторией.

Создание, внедрение в лабораторную практику новых методик анализа с низкими порогами обнаружения остатков инициаторов горения и составляющих доказательную базу результатов пожарно-технических исследований остаются актуальной научной проблемой.

Анализ последних исследований. На сегодняшний день стандартные методики обнаружения и идентификации следов инициаторов горения отсутствуют, а существующие [1, 2] требуют доработки по снижению порогов обнаружения инициаторов горения в пробах, изъятых с места пожара, что обуславливает актуальность данного исследования.

Цель исследований. Разработка методики с низкими порогами обнаружения следовых количеств ацетона, этилацетата, бензола, толуола, бензина и керосина во фрагментах, изымаемых с места пожара.

Изложение основного материала. В основу разрабатываемой методики положены три метода: десорбции для извлечения с объектов-носителей остатков легковоспламеняющихся жидкостей и метод их обнаружения с применением двух вариантов газовой хроматографии – аккумулятивной и газожидкостной.

Извлечение остатков легковоспламеняющихся жидкостей с объектов-носителей и подготовку аналитических проб к исследованиям предусмотрено

выполнять в разработанном специальном герметичном контейнере путем десорбции паров легковоспламеняющихся жидкостей с объектов-носителей без экстракции и концентрирования проб [3].

Для исследования образовавшейся в контейнере паровоздушной смеси использовали метод аккумулятивной хроматографии многокомпонентных смесей (бензин и керосин) и газожидкостной хроматографии менее сложных по составу веществ (номерные растворители, жидкости для розжига дров, каминов и др.) [4–6].

В качестве главных критериев при разработке методики приняты низкие пороги обнаружения, простота, лаконичность и информативность. Общая структура текста документа: область применения, краткое описание методики, извлечения остатков легковоспламеняющихся жидкостей с объекта-носителя и подготовки образца к анализу, химических реактивов и материалов, оборудования и условий газохроматографического анализа, приготовления сорбента, требования к параметрам пика(ов) для обнаружения компонентов легковоспламеняющихся жидкостей, общий вид хроматограмм, обработки хроматограмм, ссылки на нормативные документы и литературные источники.

Подобная структура методики удобна для исследователя, которому необходимо ее использовать. После обработки хроматограммы исследователь выясняет, насколько полученное разделение удовлетворяет поставленным аналитическим задачам.

Экспериментальные исследования выполняли на газовом хроматографе с насадочной стальной колонкой диаметром 2 мм длиной 3 м. Детектирование осуществлялось пламенно-ионизационным детектором.

Результаты исследований, приведенные в работах [4–6], позволили установить оптимальные условия хроматографирования: температуру термостата колонок (изотермический режим) 130 °С, детектора 190 °С, испарителя 200 °С, объемный расход потока газа-носителя (гелия) 30 мл/мин, воздуха 300 мл/мин и водорода 30 мл/мин. Для сравнительных экспериментов были приготовлены шесть хроматографических колонок разного состава (табл. 1).

Таблица 1

Состав хроматографических колонок

Номер колонки	Твердый носитель	Массовая доля жидкой фазы	Зернение сорбента, мм
1	Хроматон N-AW	15 % полифенилового эфира 5ф-4э	0,25...0,315
2	Хроматон N-AW	5 % полифенилового эфира 5ф-4э	0,25...0,315
3	Хроматон N-AW-DMCS	15 % апиезона L	0,25...0,315
4	Инертон AW-DMCS	10 % сквалана	0,25...0,315
5	Инертон SUPER	3 % OV-1	0,16...0,20
6	Инертон SUPER	5 % OV-1	0,16...0,20

Для каждой хроматографической колонки получены хроматограммы и определены времена выхода индивидуальных пиков веществ t_R , с.

В результате исследований разработаны сорбенты с быстрым массообменом между подвижной (газ-носитель) и неподвижной фазами – хроматон N-AW с 15 % полифенилового эфира 5ф-4э (рабочая колонка) и хроматон N-AW-DMCS с 15 % апиезона L (контрольная колонка). Разработанные сорбенты позволили эффективно и ускоренно разделить на одной хроматографической колонке вещества – представители разных классов химических соединений: ацетон (насыщенный кетон), этилацетат (этиловый эфир уксусной кислоты), бензол и толуол (ароматические углеводороды) и, следовательно, отличаются друг от друга физико-химическими свойствами.

В основу метода обнаружения и последующей идентификации сложных по составу углеводородных смесей – бензина и керосина, положен механизм разделения, который принципиально отличается от классической хроматографии разделения компонентов. Отличие заключается в групповом разделении компонентов смеси и получении суммарного выходного сигнала. Этот метод назван аккумулятивной хроматографией [4, 5].

С применением метода аккумулятивной хроматографии выполнена серия сравнительных экспериментов с различными адсорбентами: пористым стеклом, кварцевым стеклом, стеклянным бисером, а также инертными твердыми носителями с жидкими фазами различной полярности.

Разработан неполярный сорбент, который позволил найти отличительную особенность группового избирательного отделения алифатических углеводородов бензина и керосина от ароматических углеводородов и тем самым получить отпечатки групповых хроматограмм бензина и керосина, подобно криминалистическим отпечаткам пальцев. Отпечатки групповой хроматограммы и время выхода группового пика бензина и керосина, полученного на одной хроматографической колонке, приняты главными критериями идентификации.

В ходе экспериментов, выполненных с применением методов аккумулятивной и газожидкостной хроматографии, получены исходные данные для оценки значений показателей точности методики. Точность результатов измерений времен выхода хроматографических пиков обеспечивалась пятикратной повторяемостью опытов для каждого исследуемого вещества.

Для оценки значений показателей точности методики установлены главные источники, которые могут влиять на формирование показателей точности измерений: погрешность секундомера, с помощью которого измеряют время выхода хроматографического пика, погрешность хроматографа и погрешность оператора (исследователя). Рассчитана расширенная неопределенность измерений времени выхода пика исследуемых веществ при коэффициенте охвата $k = 2$, предполагая прямолинейный закон распределения значений, и определены доверительные границы погрешности измерений времен выхода пиков при доверительной вероятности 0,95.

Метод предполагает обнаружение и идентификацию инициаторов горения в следовых количествах, поэтому обязательным был расчет порога обнаружения каждого исследуемого вещества. Объединенные данные по показателям точности измерений, полученные с использованием разработанной методики, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Показатели точности измерений методики

Вещество	Порог обнаружения, г/см ³	Расширенная неопределенность измерений времени выхода пика, с, при $k = 2$	Пределы допускаемой относительной погрешности измерений времени выхода пика, %, при $p = 0,95$
Ацетон	$1,3 \cdot 10^{-10}$	0,8	$\pm 1,6$
Этилацетат	$9,7 \cdot 10^{-9}$	0,8	$\pm 1,0$
Бензол	$7,4 \cdot 10^{-10}$	0,9	$\pm 1,2$
Толуол	$1,7 \cdot 10^{-9}$	0,8	$\pm 0,6$
Бензин	$5,9 \cdot 10^{-11}$	0,9	$\pm 3,7$
Керосин	$5,0 \cdot 10^{-11}$	0,8	$\pm 1,8$

Выводы. Разработана методика с низкими порогами обнаружения бензина и керосина (10^{-11} г/см³), ацетона, этилацетата, бензола и толуола ($10^{-10} \dots 10^{-9}$ г/см³). Эта методика успешно прошла метрологическую аттестацию и внесена в реестр аттестованных методик. Применение разработанной методики в исследованиях пожаров способствует решению главной и самой сложной задачи пожарных экспертиз – надежной идентификации инициаторов горения.

Список литературы / References

1. Проблемы и перспективы использования пожарно-техническими специалистами современных способов обнаружения и исследования средств для поджога / А.А. Воронцова, Д.В. Калашников, А.А. Липский, О.А. Эсатов // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2017. – № 2 (23). – С. 72 – 77.

Vorontsova, A.A., Kalashnikov, D.V., Lipskiy, A.A., Esatov, O.A. *Problemy i perspektivy ispol'zovaniya pozharно-tekhnicheskimi spetsialistami sovremennykh sposobov obnaruzheniya i issledovaniya sredstv dlya podzhoga* [Problems and prospects of application of modern methods for detection and investigation of arson means by fire investigation specialists]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii* [Bulletin of Voronezh institute of State Firefighting Service of EMERCOM of Russia]. 2017, no. 2(23), pp. 72 – 77.

2. Принцева, М.Ю. Применение метода флуоресцентной спектроскопии для обнаружения и установления состава легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, используемых при поджогах / М.Ю. Принцева, И.В. Клаптюк, И.Д. Чешко // Пожарная безопасность. – 2010. – № 2. – С. 94 – 99.

Printseva, M.Yu., Klapyuk, I.V., Cheshko, I.D. *Primeneniye metoda fluorestsentnoy spektroskopii dlya obnaruzheniya i ustanovleniya sostava legkovosplamenyayushchikhsya i goryuchikh zhidkostey, ispol'zuyemykh pri podzhogakh* [Application of the fluorescence spectroscopy method for detection and determination of the composition of highly flammable and combustible liquids being used in arsons]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2010, no. 2, pp. 94 – 99.

3. Метод извлечения остатков горючих жидкостей с места пожара / А.А. Козлитин, В.В. Шаповалов, В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых // Вестник Академии гражданской защиты. – Донецк, 2019. – Вып. 1 (17). – С. 60 – 67.

Kozlitin, A.A., Shapovalov, V.V., Lebedeva, V.V., Nepochatykh, I.N. *Metod izvlecheniya ostatkov goryuchikh zhidkostey s mesta pozhara* [Method of extraction of combustible liquid residues from a place of fire]. *Vestnik Akademii grazhdanskoй zashchity* [Civil Defence Academy Journal of EMERCOM of DPR: scientific journal]. Donetsk, 2019, issue 1(17), pp. 60 – 67.

4. Выбор сорбента для экспрессного определения газохроматографическим методом инициаторов горения в пробах с места пожара / А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых, Т.М. Лукомская // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2016. – № 1 (53). – С. 40 – 49.

Kozlitin, A.A., Lebedeva, V.V., Nepochatykh, I.N., Lukomskaya, T.M. *Vybor sorbenta dlya ekspressnogo opredeleniya gazokhromatograficheskim metodom initsiatorov goreniya v probakh s mesta pozhara* [Choosing a sorbent for the accelerants rapid testing by the gas chromatography method in the samples taken from a place of fire]. *Nauchnyy vestnik NIIGD “Respirator”: nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 1 (53), pp. 40 – 49.

5. Козлитин, А.А. Обнаружение и идентификация остатков нефтепродуктов после пожаров / А.А. Козлитин, В.В. Лебедева // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2018. – № 3 (55). – С. 68 – 73.

Kozlitin, A.A., Lebedeva, V.V. *Obnaruzheniye i identifikatsiya ostatkov nefteproduktov posle pozharov* [Detection and identification of oil products residues after fires]. *Nauchnyy vestnik NIIGD “Respirator”: nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2018, no. 3(55), pp. 68 – 73.

6. Исследование возможности определения легковоспламеняющихся жидкостей методом газовой хроматографии / А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых, О.В. Храпоненко, Т.М. Лукомская, О.Н. Щербакова // Вестник Института гражданской защиты Донбасса. – Донецк, 2015. – Вып. 2 (2). – С. 38 – 44.

Kozlitin, A.A., Lebedeva, V.V., Nepochatykh, I.N., Khraponenko, O.V., Lukomskaya, T.M., Shcherbakova, O.N. *Issledovaniye vozmozhnosti opredeleniya legkovosplamennaya-yushchikhsya zhidkostey metodom gazovoy khromatografii* [Investigation of possibility to determine highly flammable liquids by the gas chromatography method]. *Vestnik Instituta grazhdanskoy zashity Donbassa* [Bulletin of The Civil Defence Institute of Donbass]. Donetsk, 2015, issue 2(2), pp. 38 – 44.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Высоцким
Дата поступления рукописи 17.04.2020

Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;
Viktoria Valentinovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;
Igor Nikolayevich Nepochatykh, scientific associate; e-mail: tamdoka@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-55

METHODOLOGY OF DETECTION OF ACCELERANTS IN FRAGMENTS OF BURNT MATERIALS

Purpose. Development of the methodology for detecting the residues of highly flammable liquids, i.e. means for committing arsons, in materials extracted from a place of fire.

Methods. Extraction of the residues of highly flammable liquids from fabric, soil, timber by the desorption method. Investigations of the gaseous samples by the methods of accumulative and gas-liquid chromatography. Mathematical processing of data and assessment of values of the measurement precision indices.

Results. The sorbents for operation and control packed columns have been developed as well as the complex methodology for extraction and detection of residues of acetone, vinegar naphtha, benzene and toluene, i.e. base components of highly flammable liquids, by the gas-liquid chromatography method, and also those ones of benzine and kerosene by the accumulative chromatography methods in the fragments of burnt materials. The retention times of individual peaks of the components of highly flammable liquids as well as the group peaks of benzine and kerosene have been determined. The assessment of values of the measurement precision indices has been given, the expanded uncertainty and the limits of maximum permissible error of measurements have been computed.

Scientific novelty. The methodology has been developed for extracting the residues of highly flammable liquids from the carrier objects of various nature (fabric, soil, timber) and detecting their key components by the gas chromatography as well as detecting benzine and kerosene in the materials extracted from a place of fire.

Practical value. The main differential characteristic of the methodology is a combination of low-threshold detection, at the level of nanoconcentrations (below 10^{-9} g/cm³), with rapidity (time expenditures on a single probe analysis make approximately 5 min) and implementation simplicity. The high sensitivity has permitted to get rid of extraction and concentration of samples. The methodology application area is fire-technical investigations of fragments extracted from a place of fire for detection the causes of fires related to arsons.

Keywords: *gas chromatography; accelerant; highly flammable liquid; method of detection; fire-technical investigations; threshold of detection.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 351.66(083.13)

Вадим Борисович Капустин, директор департамента гражданской обороны и защиты населения МЧС ДНР; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики

283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел. (+38 062) 340-62-88

Анатолий Филиппович Долженков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru

Татьяна Олеговна Мороз, инж.; e-mail: tatiana.moroz@rambler.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,

пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-43

АНАЛИЗ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ДНР ПО ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЕ

Цель. Создание типового перечня документов по гражданской обороне, подлежащих разработке в органах исполнительной власти, местных администрациях городов и районов, организациях, учреждениях и предприятиях всех форм собственности.

Методика. Анализ и обобщение существующих нормативных правовых и методических документов Донецкой Народной Республики, других государств по гражданской обороне.

Результаты. Создан типовой перечень документов по гражданской обороне, подлежащих разработке в органах исполнительной власти, местных администрациях городов и районов, организациях, учреждениях и предприятиях всех форм собственности.

Научная новизна. Найден подходы, позволяющие совершенствовать качество мероприятий по гражданской обороне, проводимых в министерствах и ведомствах, муниципалитетах, организациях, учреждениях и на предприятиях.

Практическая значимость. Внедрение мероприятий по гражданской обороне, проводимых в министерствах и ведомствах, муниципалитетах, организациях, учреждениях и на предприятиях, содействует улучшению общего состояния системы гражданской обороны в Донецкой Народной Республике.

Ключевые слова: гражданская оборона; чрезвычайные ситуации; система управления гражданской обороной; группа территорий по гражданской обороне; организации, отнесенные в установленном порядке к категориям по гражданской обороне.

Постановка задачи. Мероприятия по гражданской обороне (далее – ГО) становятся все более востребованными, социально ориентированными и направленными на обеспечение безопасности жизнедеятельности населения, что обуславливает необходимость повышения готовности ГО к функционированию, совершенствованию и развитию в мирное и военное время. Анализ чрезвычайных и кризисных ситуаций последних лет показывает, что риски крупномасштабных чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера возрастают [1, 2]. Об этом свидетельствуют аварии на промышленных предприятиях и шахтах, природные пожары [3, 4]. Напряженной остается и военно-политическая обстановка. Таким образом, в современных условиях значимость мероприятий ГО как важнейшей государственной системы, обеспечивающей безопасность государства и его граждан от угроз мирного

и военного времени, многократно возрастает и требует повышения готовности ГО, ее совершенствования и развития.

Анализ последних исследований. Основные принципы развития ГО в настоящее время [5]:

- заблаговременность подготовки государства к ведению ГО в мирное время с учетом развития вооружения, военной техники и средств защиты населения;

- необходимая (разумная) достаточность при организации и выполнении мероприятий по ГО;

- обеспечение постоянной готовности сил ГО к действиям в условиях военного времени и при крупномасштабных чрезвычайных ситуациях мирного времени, их стратегической мобильности;

- реформирование ГО в рамках общей стратегии развития военной организации государства, направленной на повышение обороноспособности страны, мобилизационной готовности, эффективности защиты населения и территорий;

- использование новых форм и методов защиты населения и территорий от опасностей, возникающих при ведении военных действий или вследствие этих действий, а также при чрезвычайных ситуациях;

- финансирование ГО со стороны государства и со стороны муниципальных образований и объектов экономики, продолжающих работать в военное время;

- рациональное расходование средств на основе критерия «затраты – эффективность»;

- повышение социальной значимости ГО, оказание помощи населению в кризисных ситуациях.

Система ГО – единая вертикально интегрированная система управления силами и средствами, независимо от организационно-правовых основ их создания, для обеспечения защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций мирного и военного времени. Вопросы организации и ведения ГО в Донецкой Народной Республике достаточно сложны и многогранны, от их решения зависит целостность системы обеспечения защищенности населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и биолого-социального характера, а также от террористических проявлений.

Полнота, качество и своевременность решения вопросов ГО в органах исполнительной власти, в муниципальных образованиях и организациях непосредственно влияет на практический результат деятельности по выполнению требований республиканского законодательства в области ГО, а также на безопасность проживания (нахождения) граждан на соответствующей административной территории.

Базовая исходная информация для оценки состояния гражданской обороны и планирования эффективных мероприятий по предупреждению или

недопущению чрезвычайных ситуаций – нормативно-правовая база по ГО, несущая максимум информации об организации и эффективности внедрения комплекса мероприятий по ГО с целью обеспечения постоянной готовности сил и средств ГО к действиям в условиях военного времени и при крупномасштабных чрезвычайных ситуациях в мирное время.

Цель исследования. Создание типового перечня документов по гражданской обороне, подлежащих разработке в органах исполнительной власти, местных администрациях городов и районов, организациях, учреждениях и предприятиях всех форм собственности.

Результаты исследования. Основные методы, используемые при выполнении работы, – анализ и обобщение действующих нормативных и правовых документов Донецкой Народной Республики и Российской Федерации в области гражданской обороны. Были изучены опубликованные в печати работы, касающиеся вопросов организации и ведения гражданской обороны. Особое внимание уделялось методическому обеспечению и законодательное регулирование системы гражданской обороны. В работе использована методология системного подхода, позволяющая рассмотреть весь комплекс взаимодействующих объектов и выявить взаимосвязи между элементами структуры гражданской обороны государства в целом.

Нормативно-правовая база по ГО относится к вопросам:

- защиты населения и территорий при угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и от их последствий, а также в условиях ведения военных действий;
- применения комплекса превентивных мероприятий (оповещение населения об опасностях, возникающих при ведении военных действий или вследствие этих действий; при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера; обеспечение укрытия в защитных сооружениях ГО и средствами индивидуальной защиты; эвакуацию населения, материальных и культурных ценностей в безопасные районы; инженерную, медицинскую, биологическую, радиационную и химическую защиту);
 - декларирования безопасности объектов повышенной опасности;
 - выполнения инженерно-технических мероприятий ГО;
 - государственного контроля и надзора в области ГО, взаимодействия органов управления сил и средств ГО, предназначенных для предупреждения и реагирования на чрезвычайные ситуации;
 - подготовки и переподготовки руководящего состава ГО, ее органов управления и сил, обучение населения действиям при чрезвычайных ситуациях;
 - организации и проведении спасательных и других неотложных работ в районах возникновения чрезвычайных ситуаций жизнеобеспечения населения, пострадавшего при ведении военных действий или вследствие этих действий при возникновении чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [1];

- отнесения организаций к категориям по ГО в зависимости от их оборонного и экономического значения, риска возникновения чрезвычайных ситуаций военного и мирного времени [1], в целях дифференцированного подхода к заблаговременной подготовке мероприятий ГО в объемах, необходимых и достаточных для защиты населения.

Отнесению к категориям по ГО подлежат действующие, реконструируемые, технически перевооружаемые, строящиеся и проектируемые субъекты хозяйствования, имеющие мобилизационное задание (заказ), представляющие высокую степень потенциальной опасности возникновения чрезвычайных ситуаций в военное и мирное время, на балансе или в оперативном управлении которых находятся объекты культурного наследия [5, 6].

Категорию по ГО устанавливают в зависимости от показателей, определяющих роль организаций в экономике Донецкой Народной Республики, а также особых условий, характеризующих степень потенциальной опасности возникновения чрезвычайных ситуаций, месторасположение субъекта хозяйствования, а также значимость субъекта хозяйствования как объекта культурного наследия. Основные показатели для отнесения субъектов хозяйствования к категориям по ГО – численность работающих (общая, наибольшей работающей смены) в военное время и объем выпускаемой продукции (работ, услуг) для нужд Донецкой Народной Республики в военное время.

Дополнительные критерии для отнесения юридических лиц к категориям по ГО устанавливает МЧС ДНР с участием Министерства экономического развития Донецкой Народной Республики и по согласованию с заинтересованными республиканскими органами исполнительной власти. В Порядке отнесения субъектов хозяйствования к категориям по ГО установлены следующие категории: особой важности, первая, вторая. Административно-территориальные единицы Донецкой Народной Республики относятся к группам по ГО в порядке, установленном Правительством Донецкой Народной Республики. Его определяет Порядок отнесения территорий к группам по гражданской обороне [1, 7].

Отнесение территорий к группам по ГО осуществляется в зависимости от следующих критериев:

- оборонного и экономического значения;
- численности населения территории;
- нахождения на территории предприятий, учреждений и организаций, независимо от их организационно-правовых форм и форм собственности, а также входящих в их состав отдельных объектов, отнесенных в установленном порядке к категориям по ГО;
- процентного соотношения площади территории или численности населения территории, попадающих в зону возможного химического заражения, радиоактивного загрязнения или катастрофического затопления.

В соответствии с требованиями [7] для территорий устанавливаются следующие группы по ГО: особая, первая, вторая.

К особой группе территорий по ГО, в связи с оборонным и экономическим значением, относится территория столицы Донецкой Народной Республики – город Донецк.

К первой группе территорий по ГО относится территория:

- численность населения которой один миллион человек и более;
- численность населения которой от 500 тысяч человек до одного миллиона человек, при этом на ней расположены не менее трех юридических лиц особой важности по ГО или более 50 юридических лиц, отнесенных в установленном порядке к категориям по ГО;
- более 50 % площади территории или численности населения которой попадают в зону возможного химического заражения или радиоактивного загрязнения или катастрофического затопления.

Ко второй группе территорий по ГО относится территория:

- численность населения которой от 500 тысяч человек до одного миллиона человек;
- численность населения которой от 150 тысяч человек до 500 тысяч человек и на ней расположены не менее двух юридических лиц особой важности по ГО либо более 20 юридических лиц, отнесенных в установленном порядке к категориям по ГО;
- более 30 % площади которой или численности населения ее попадают в зону возможного химического заражения, радиоактивного загрязнения или катастрофического затопления.

Не подлежат отнесению к группам по ГО территории с численностью до 50 тысяч человек по критерию процентного соотношения площади территории или численности населения территории, попадающих в зону возможного химического заражения или радиоактивного загрязнения, или катастрофического затопления.

Все документы по ГО, действующие на территории Донецкой Народной Республики, можно структурировать по следующему принципу:

- документы по гражданской обороне, подлежащие разработке в органах исполнительной власти и местных администрациях городов и районов, организациях, учреждениях и предприятиях всех форм собственности;
- планы гражданской обороны, разрабатываемые органами исполнительной власти и муниципальными образованиями, организациями, учреждениями и предприятиями всех форм собственности.

Анализ структуры и содержания документов по гражданской обороне, подлежащих разработке в организациях, учреждениях и предприятиях всех форм собственности показал, что в соответствии с нормативными правовыми документами в целях реализации полномочий в области ГО и защиты от чрезвычайных ситуаций в организациях, учреждениях и на предприятиях всех

форм собственности (далее – организациях) должны разрабатывать и использовать в практической работе планирующие, распорядительные, отчетные, рабочие и справочные документы.

К планирующим документам относятся планы всех видов с установленными для них приложениями.

К распорядительным документам относятся приказы, распоряжения и указания руководителя организации и вышестоящих органов.

К отчетным документам относятся донесения, сводки, доклады и др.

К рабочим и справочным документам относятся различные инструкции, схемы, расчеты, таблицы, ведомости и т.д. [8].

Разработка всех этих документов осуществляется в соответствии с рекомендациями МЧС ДНР.

На основании проведенного анализа нормативно-правовой базы по ГО был создан Типовой перечень документов по гражданской обороне, подлежащих разработке в органах исполнительной власти, местных администрациях городов и районов, организациях, учреждениях и предприятиях всех форм собственности (далее – Типовой перечень), который структурирован по видам разрабатываемых документов в зависимости от их назначения. Типовой перечень содержит названия документов, подлежащих разработке, а также информацию о том, каким именно органам власти и организациям необходимо разрабатывать соответствующий документ.

Выводы. Проведены исследования нормативных и правовых актов в области ГО в Донецкой Народной Республике, выполнен анализ структуры и содержания документов по ГО, подлежащих разработке в органах исполнительной власти и местных администрациях городов и районов, в организациях, учреждениях и предприятиях всех форм собственности. Создан Типовой перечень документов по гражданской обороне, подлежащих разработке в органах исполнительной власти, местных администрациях городов и районов, организациях, учреждениях и предприятиях всех форм собственности.

Список литературы / References

1. О гражданской обороне: Закон Донецкой Народной Республики: [принят Постановлением Народного Совета Донецкой Народной Республики 13 февраля 2015 г. № 07-ИНС]. – Донецк, 2016. – 17 с.

O grazhdanskoy oborone: Zakon Donetskoy Narodnoy Respubliki: [prinyat Postanovleniyem Narodnogo Soveta Donetskoy Narodnoy Respubliki 13 fevralya 2015 g. № 07-ИНС] [The Donetsk People's Republic Law "On Civil Defence" (as amended by DPR People's Council Resolution of February 13, 2015 No. 07-ИНС)]. Donetsk, 2016, 17 p.

2. Евстафьев, И.Ю. Методические рекомендации по организации и ведению гражданской обороны в муниципальных образованиях и организациях. – Ростов-на-Дону, 2009. – 119 с.

Yevstaf'yev, I.Yu. *Metodicheskiye rekomendatsii po organizatsii i vedeniyu grazhdanskoj oborony v munitsipal'nykh obrazovaniyakh i organizatsiyakh* [Methodological recommendations on organizing and conducting the civil defence training in municipal entities and organizations]. Rostov-on-Don, 2009, 119 p.

3. Аварии и катастрофы. Предупреждение и ликвидация последствий. Книга 3: моногр. – М.: Издательство Ассоциации строительных вузов, 2016. – 416 с.

Avarii i katastrofy. Preduprezhdeniye i likvidatsiya posledstviy. Kniga 3: monogr. [Accidents and disasters. Prevention and elimination of consequences. Book 3: monograph]. Moscow, Izdatel'stvo Assotsiatsii stroitel'nykh vuzov Press, 2016, 416 p.

4. Егоров, А.Ф. Анализ риска, оценка последствий аварий и управление безопасностью химических и нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств / А.Ф. Егоров, Т.В. Савицкая. – М.: Колос, 2010. – 526 с.

Yegorov, A.F., Savitskaya, T.V. *Analiz riska, otsenka posledstviy avariya i upravleniye bezopasnost'yu khimicheskikh i neftepererabatyvayushchikh i neftekhimicheskikh proizvodstv* [Risk assessment, estimation of aftermath of accidents and safety management of chemical and oil refinery and petrochemical plants]. Moscow, Kolos Publ., 2010, 526 p.

5. Положение о гражданской обороне: [утверждено Постановлением Совета Министров Донецкой Народной Республики 09 апреля 2015 г. № 5-10]. – Донецк, 2015. – 17 с.

Polozheniye o grazhdanskoj oborone: [utverzhdено Postanovleniyem Soveta Ministrov Donetskoy Narodnoy Respubliki 09 aprelya 2015 g. № 5-10] [Regulation on Civil Defence: (as amended by Resolution of the Council of Ministers of the Donetsk People's Republic of April 09, 2015 No. 5-10)]. Donetsk, 2015, 17 p.

6. Порядок отнесения субъектов хозяйствования к категориям по гражданской обороне: [утверждено Постановлением Правительства Донецкой Народной Республики 07 августа 2019 г. № 21-12]. – Донецк, 2019. – 13 с.

Poryadok otneseniya sub'yektov khozyaystvovaniya k kategoriyam po grazhdanskoj oborone: [utverzhdено Postanovleniyem Pravitel'stva Donetskoy Narodnoy Respubliki 07 avgusta 2019 g. № 21-12] [Procedure for assigning business entities to civil defence classes: (as amended by Resolution of the Government of the Donetsk People's Republic of August 7, 2019 No. 21-120)]. Donetsk, 2019, 13 p.

7. Порядок отнесения территорий к группам по гражданской обороне: [утвержден Постановлением Совета Министров Донецкой Народной Республики 13 сентября 2018 г. № 2-33]. – Донецк, 2018. – 7 с.

Poryadok otneseniya territoriy k gruppam po grazhdanskoj oborone: [utverzhdyen Postanovleniyem Soveta Ministrov Donetskoy Narodnoy Respubliki 13 sentyabrya 2018 g. № 2-33] [Procedure for assigning territories to groups of civil defence: (as amended by Resolution of the Council of Ministers of the Donetsk People's Republic of September 13, 2018 No. 2-33)]. Donetsk, 2018, 7 p.

8. Основные документы, разрабатываемые в организациях по вопросам гражданской обороны и защиты населения от чрезвычайных ситуаций. – Тольятти, 2018. – 278 с.

Osnovnyye dokumenty, razrabatyvayemye v organizatsiyakh po voprosam grazhdanskoj oborony i zashchity naseleniya ot chrezvychaynykh situatsiy [Principal documentation developed in organizations on civil defence and protection of population against emergencies]. Togliatti, 2018, 278 p.

Рекомендовано к публикации д-р техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 29.04.2020

Vadim Borisovich Kapustin, director of Civil Defence and Population Protection Department;
e-mail: mchs-dnr@mail.ru

*The Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences
of Natural Disasters of the Donetsk People's Republic*

283050, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone (+38 062) 340-62-88;

Anatoly Filippovich Dolzhenkov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru;

Tatyana Olegovna Moroz, engineer; e-mail: tatiana.moroz@rambler.ru

*The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-43

ANALYSIS OF THE DONETSK PEOPLE'S REPUBLIC REGULATORY FRAMEWORK IN THE FIELD OF CIVIL DEFENCE

Purpose. Creation of the standard list of civil defence documents subjected to the development by bodies of the executive power, local authorities of cities and districts, organizations, institutions and enterprises of all forms of ownership.

Methodology. Analysis and generalization of existing statutory and regulatory and guidance documents of the Donetsk People's Republic and other states in the field of civil defence.

Results. The standard list of the civil defence documents subjected to development by bodies of the executive power, local authorities of cities and districts, organizations, institutions and enterprises of all forms of ownership has been created.

Scientific novelty. The approaches have been found that allow improving the quality of civil defence measures conducted at the ministries and governmental agencies, city administrations, organizations, institutions and enterprises.

Practical value. The implementation of civil defence measures conducted at the ministries and governmental agencies, city administrations, organizations, institutions and enterprises furthers improvement of the general state of civil defence system of the Donetsk People's Republic.

Keywords: *civil defence; emergencies; civil defence management system; local civil defence group; organizations duly categorized by classes of civil defence.*

УДК 628.165:66.081.63

Сергей Павлович Высоцкий, д-р техн. наук, завкафедрой; e-mail: sp.vysotsky@gmail.com

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. (+38 071) 391-35-97;

Александра Александровна Печенога, магистрант; e-mail: rogovenko.2608@gmail.com

Автомобильно-дорожный институт Государственного образовательного учреждения высшего
профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»

284646, Горловка, ул. Кирова, 51. Тел. (+38 0624) 55-29-67

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОБРАТНООСМОТИЧЕСКОГО ОБЕССОЛИВАНИЯ ВОДЫ

Цель. Анализ системы обратного осмоса для очистки промышленных стоков и шахтных вод.

Методика. Анализ работы систем обратного осмоса по публикациям в научно-технической литературе и расчет показателей работы указанных систем при использовании кристаллизаторов труднорастворимых солей.

Результаты. Применение кристаллизаторов при рециркуляции рассола позволяет исключить сброс засоленных стоков и обеспечивает продувание системы, в результате которого полученные твердые соли могут быть применены в разных отраслях промышленности.

Научная новизна. Обеспечение стабильной работы систем обратного осмоса при обессоливании вод повышенной минерализации, например шахтных вод и продувочных вод градирен, а также экономия водных ресурсов.

Практическая значимость. Система обратного осмоса позволяет повысить эколого-экономическое совершенство систем очистки промышленных стоков, а также очистки шахтной воды за счет встроенного устройства для осаждения солей.

Ключевые слова: обратный осмос; пермиат; рН; давление; труднорастворимые соли.

Постановка проблемы. Мембранная сепарация стала широко используемой технологией очистки промышленных сточных вод. Наличие экологических проблем, ужесточение экологических норм и улучшение экономической эффективности процесса привели к росту конкурентоспособности технологии мембранного разделения во всех отраслях промышленности [1, 2]. Применение технологии обратного осмоса включает очистку сточных вод с высокой концентрацией органических веществ, сточных вод от гальванических и металлообрабатывающих производств, целлюлозно-бумажной, горно-добывающей, нефтехимической, текстильной и пищевой промышленности.

Мембранная технология не всегда обеспечивает окончательное решение для очистки поверхностных и сточных вод из-за нескольких недостатков, которые ограничивают ее использование. Обычное мембранное разделение может быть ограничено, когда необходимо регулировать качество питающей воды и степень извлечения пермиата, а также в условиях высокой концентрации труднорастворимых солей.

Система обратного осмоса с интегрированным циклом осаждения соли преодолевает вышеуказанные ограничения [3]. Система позволяет эксплуатировать технологию обратноосмотического обессоливания с переменным качеством питающей воды и концентрацией соли от 1000 до 70 000 мг/дм³, а также при степени извлечения обессоленной воды в диапазоне от 25 до 99 %.

Анализ последних исследований и публикаций. Надежную эксплуатацию традиционных систем обратного осмоса в промышленных системах очистки воды обеспечивает только качественная предочистка поступающей воды. Система обратного осмоса со встроенным устройством осаждения солей – идеальное решение для сложных типов сточных вод. Благодаря интегрированному устройству осаждения солей единственным ограничивающим фактором системы становится осмотическое давление рассола, а не пересыщение труднорастворимыми солями [1 – 3].

Эта технология позволяет значительно экономить эксплуатационные расходы промышленных водоочистных сооружений за счет снижения потребления реагентов и количества рассола (ретентата), подлежащего сбросу. В большинстве случаев достигается значительная экономия инвестиционных затрат благодаря высокому уровню выхода пермиата.

Изложение основного материала. При разработке систем обратного осмоса для очистки сточных вод всегда сталкиваются с проблемой баланса между капитальными и эксплуатационными расходами. Обратный осмос должен производить необходимое качество и количество пермиата с минимальной или предсказуемой частотой очистки, стараясь исключить или свести к минимуму загрязнение коллоидными примесями, биологическое обрастание и образование накипи.

Система основана на хорошо известном методе рециркуляции рассола, который включен почти во все коммерчески доступное программное обеспечение. Рассол полностью рециркулирует обратно в питающий резервуар, а пермиат постоянно выводится из системы. Уровень воды в питающем резервуаре поддерживается постоянно за счет добавления свежей питательной воды, которая заменяет забраный пермиат. Концентрация солей в питающем резервуаре постепенно увеличивается, пока не будет достигнут необходимый ее уровень, который соответствует определенной степени обессоливания в обратном осмосе. В этот момент резервуар, в котором содержится рассол с концентрацией, соответствующей определенной степени извлечения, дренируется, а затем заполняется свежей питательной водой (рис. 1).

Преимущества этого метода работы:

- высокая и независимая степень регулирования выхода пермиата позволяет работать по одноступенчатой схеме обессоливания, с хорошим балансом потока между элементами, самым низким потоком в критических элементах и самыми высокими скоростями поперечного потока и потока концентрата;

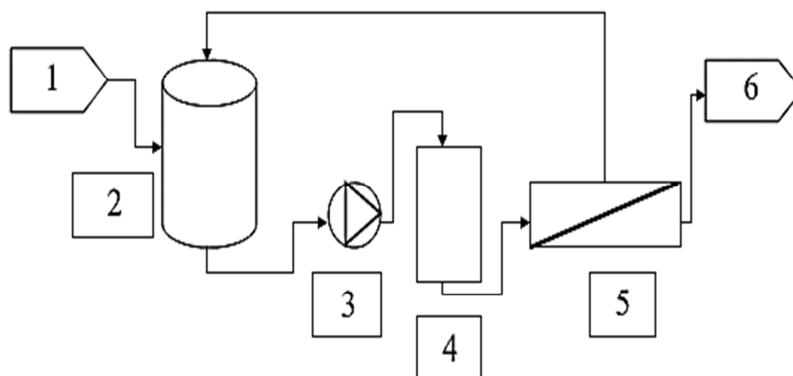


Рис. 1. Полупериодический метод обратного осмоса:

1 – исходная вода; 2 – бак-накопитель исходной воды; 3 – питательный насос;
4 – фильтрация; 5 – обратный осмос; 6 – очищенная вода

- перспектива достижения разных уровней общего выхода пермиата в одной и той же системе; рециркуляция рассола может быть остановлена при любом выходе пермиата на любом уровне концентрации рассола в обратном осмосе;
- возможность работы с переменными уровнями концентрации соли в поступающей воде;
- малое биологическое загрязнение мембран из-за переменной концентрации соли или переменного осмотического давления, которому подвергаются мембранные элементы во время цикла деминерализации;
- низкая склонность к образованию накипи и способность растворять накипь в результате малой концентрации солей, при которой работают последние элементы в начале каждого цикла.

Нужно отметить, что полупериодический метод реализует почти все преимущества, перечисленные выше. Конечно, у каждого метода есть свои недостатки. Недостатки этого метода – слегка увеличенное потребление энергии, которое относительно незначительно в большинстве случаев очистки промышленных сточных вод, более высокие инвестиционные затраты и ограничение максимального извлечения обратного осмоса при осаждении труднорастворимых солей.

Чтобы преодолеть ограничение извлечения труднорастворимых солей, в линию рециркуляции рассола вводят установку осаждения соли. Цель этого устройства – осаждение избытка труднорастворимых солей, что ограничивает выход пермиата в системе обратного осмоса. Максимальное извлечение разработанной системы обратного осмоса с интегрированным циклом осаждения соли ограничивается только максимальным осмотическим давлением рассола и не зависит от умеренных концентраций солей (рис. 2).

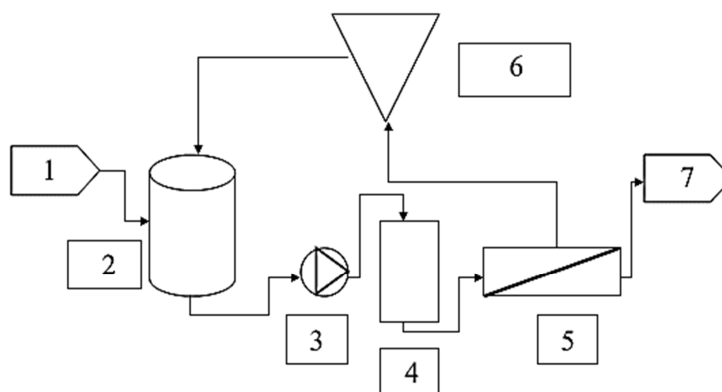


Рис. 2. Система обратного осмоса с интегрированным циклом осаждения соли:
 1 – исходная вода; 2 – бак-накопитель исходной воды; 3 – питательный насос;
 4 – фильтрация; 5 – обратный осмос; 6 – осаждение солей; 7 – очищенная вода

Основное преимущество системы – способность удалять только избыток труднорастворимых солей, что предотвращает увеличение степени извлечения, и удерживать раствор в границах антинакипной активности, как показано на рис. 3. Растворимые соли не оседают в блоке осаждения соли и создают максимальное осмотическое давление в конце цикла, в то время как труднорастворимые соли постепенно удаляются в блоке осаждения соли и их концентрация поддерживается ниже предела максимальной способности антинакипной присадки в течение цикла. Тот факт, что только избыточные труднорастворимые соли удаляются в течение цикла, значительно снижает эксплуатационные затраты на установку для осаждения соли по сравнению с конкурентными эксплуатационными методами.



Рис. 3. Поведение растворимых и труднорастворимых солей во время рабочего цикла

Чтобы поддерживать постоянное производство пермиата, в системе обычно используют два питающих резервуара. Пока один резервуар работает и накапливает рассол, другой резервуар дренируется и заполняется свежей питательной водой, после чего он ожидает следующего цикла.

Степень осаждения солей – ключевой фактор в созданной системе. Система обеспечивает возможность работы с различными условиями пересыщения, труднорастворимыми солями и уровнями концентрации соли. Это обеспечивает такие преимущества: малое время нахождения в зоне осаждения, незначительные последствия рециркуляции, минимальные затраты при обработке осадка, низкое потребление реагентов, низкие инвестиционные затраты.

Установка для осаждения соли, которая наилучшим образом соответствует вышеуказанным целям, представляет собой реактор с псевдооживленным слоем. Принцип работы реактора с псевдооживленным слоем заключается в следующем: реактор частично заполнен соответствующими затравочными частицами, а рассол перекачивается вверх через этот слой, поддерживая их в состоянии псевдооживления. Затравочные частицы используют в качестве вещества, на котором происходит кристаллизация, обеспечивая большую площадь поверхности, которая снижает необходимую энергию для осаждения. Антискалант, который предотвращает образование накипи на мембранах, вместе со труднорастворимыми солями, также адсорбируется и осаждается на затравочных частицах. По мере того как кристаллы становятся все тяжелее, они постепенно опускаются на дно псевдооживленного слоя. Периодически, не прерывая работу реактора, нижняя часть слоя выгружается в контейнер с перфорированным дном и в реактор вводится свежий затравочный материал. Фильтр или другое механическое оборудование для обезвоживания не требуется. Массовая доля сухих твердых веществ в полученных кристаллах составляет более 90 %, они могут быть использованы для захоронения отходов, строительства дорог, в качестве кормовой добавки для животных, в производстве цемента и в других целях. Разработанная система обратного осмоса со встроенным устройством осаждения солей – идеальное решение для сложных типов сточных вод, что особенно важно при очистке шахтных вод.

Один из примеров – работа установки очистки продувочных вод градирни. Цель применения – уменьшение обратноосмотического концентратора, снижение сброса градирни до нуля. Дополнительной проблемой проекта был тот факт, что градирня использует стоки очистных сооружений в качестве подпитки. Продувка характеризуется высокой концентрацией анионов кремнекислоты, гидрокарбонатов, кальция и органических веществ.

Первоначально предложенная схема предназначалась, чтобы максимально удалить ионы жесткости, при этом используя умягчение воды известью, затем более глубокое умягчение методом ионного обмена с последующим

концентрированием стоков по обратноосмотической технологии. Предполагалось уменьшить образование накипи из кремнекислых соединений и загрязнение поверхностей теплообмена органическими веществами с последующим испарением и окончательным удалением рассола в кристаллизаторе. При описанной схеме работы потребляется большое количество реагентов, особенно на стадии удаления ионов жесткости: 3200 кг в день извести, 2300 кг в день кальцинированной соды, 800 кг в день хлорида натрия, 200 кг в день 32 %-й соляной кислоты и 100 кг в день 50 %-го гидроксида натрия.

Альтернативное решение для обработки – внедрение созданной системы обратного осмоса с интегрированной установкой осаждения соли. Система предназначена для работы при умеренном уровне pH и для удаления двух составляющих солей из рассола – кальция и кремнезема. Это осуществляется в одностадийной установке для осаждения карбоната кальция вместе с силикатом кальция. Из-за недостатка ионов кальция в рассол непрерывно добавляют 1700 кг в день извести. При этом обеспечивается значительная экономия реагентов; потребление извести сокращается с 3200 до 1700 кг в сутки, а использование кальцинированной соды исключается.

Система рассчитана на 40 %-е извлечение пермиата и максимальное давление рассола 7,5 МПа, что соответствует общему извлечению 97,5 %. Пятиступенчатая конфигурация с несколькими межступенчатыми насосами необходима для применения традиционной системы обратного осмоса для такой высокой степени извлечения,

Выход 40 % достигается за счет одноступенчатой конструкции с хорошим балансом потока между элементами (средний поток 18,3 л/м² в час, поток через мембраны 19,2 л/м² и поток через последний элемент 17,2 л/м² в час), и высокие скорости поперечного потока и концентрата.

Из-за небольшого количества оставшегося рассола упрощается технология его обработки в кристаллизаторе. Хотя энергопотребление при рециркуляции рассола через кристаллизатор выше по сравнению с традиционной технологией без использования кристаллизатора: 2,2 кВт·ч/м³ по сравнению с нетрадиционной технологией 1,25 кВт·ч/м³, общее энергопотребление, удельный расход электроэнергии по рассматриваемому методу значительно ниже. Удельный расход 3,4 кВт/м³ по сравнению с традиционным методом 5,7 кВт/м³ (экономия 40 %).

Экономия затрат на сброс твердых веществ также значительна. Количество кристаллов, выгружаемых из установки солевого осаждения, 4400 кг в день по сравнению с 15 000 кг в день твердых веществ, полученных с помощью умягчения известью по первоначальной технологии.

Следовательно, альтернативное решение предпочтительно из-за экономии эксплуатационных расходов, а также более низких инвестиционных затрат.

Выводы. Система обратного осмоса со встроенным устройством осаждения солей – идеальное решение для сложных типов сточных вод,

которые встречаются в промышленности. Значительные преимущества позволяют этой технологии успешно решать различные задачи, такие как осаждение на мембранах труднорастворимых солей и биологическое обрастание. Система позволяет эксплуатировать обратный осмос с переменным качеством питающей воды, концентрацией соли от 1000 до 70 000 мг/дм³, а также при извлечении воды в диапазоне от 25 до 99 %. Благодаря встроенной установке осаждения соли единственным ограничивающим фактором системы обратного осмоса становится осмотическое давление рассола, а не перенасыщение труднорастворимых солей. Технология позволяет значительно экономить эксплуатационные расходы за счет уменьшения потребления реагентов и количества отходов, подлежащих удалению. Достигается значительная экономия инвестиционных затрат благодаря большому выходу пермиата, который может быть достигнут в системе. Хотя потребление энергии в разработанной системе выше, чем в обычной системе обратного осмоса, экономия на расходе химических веществ компенсирует эти расходы.

Список литературы / References

1. Al-Zoubi, H., Rieger, A., Steinberger, P., Pelz, W. et al. Optimization study for treatment of acid mine drainage using membrane technology. *Separation Science and Technology*, 2010, vol. 45, issue 14, pp. 2004 – 2016.

2. Высоцкий, С.П. Снижение вредного воздействия горных предприятий на окружающую среду / С.П. Высоцкий, С.Е. Гулько // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 1(54). – С. 56 – 74.

Vysotskiy, S.P., Gul'ko, S.Ye. *Snizheniye vrednogo vozdeystviya gornykh predpriyatiy na okruzhayushchuyu sredu* [Reducing the noxious effect of mining enterprises on the environment]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2017, no. 1 (54), pp. 56 – 74.

3. Hasson, D., Drak, A., Semiat, R. Inception of CaSO₄ scaling on RO membranes at various water recovery levels. *Desalination*, 2001, vol. 139, issue 1 – 3, pp. 73 – 81.

Рекомендовано к публикации д-ром хим. наук А.И. Сердюком
Дата поступления рукописи 23.03.2020

Sergey Pavlovich Vysotskiy, Dr. Sci. (Tech.), department chair; e-mail: sp.vysotsky@gmail.com

The State Educational Institution of Higher Occupational Education

“The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture”

286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone (+38 071) 391-35-97;

Aleksandra Aleksandrovna Pechenoga, master’s student; e-mail: rogovenko.2608@gmail.com

The Automobile Engineering Institute of the State Educational Institution of Higher Occupational Education

“The Donetsk National Technical University”

284646, Gorlovka, 51, ulitsa Kirova. Phone (+38 0624) 55-29-67

IMPROVEMENT OF REVERSE OSMOSIS FOR WATER DESALINATION

Purpose. Analysis of the reverse osmosis system for treatment of industrial effluents and mine waters.

Methodology. Analysis of the operation of reverse osmosis systems based on the publications in scientific and technical literature and calculation of performance indices of the mentioned systems using crystallizing evaporators of low-solubility salts.

Results. The application of the crystallizing evaporators for reject water makes it possible to eliminate the discharge of salinized effluents and ensures system purging as a result of that the produced solid salts may be used in various industry branches.

Scientific novelty. Support of the stable operation of the reverse osmosis systems during the desalination of high salinity waters, such as mine waters and purge waters of evaporative cooling towers, as well as saving of water resources.

Practical value. The reverse osmosis system enables to improve the ecological and economic efficiency of treatment systems of the industrial effluents, as well as mine water treatment due to the built-in device for salt precipitation.

Keywords: *reverse osmosis; permeate; pH level; pressure; low-solubility salts.*

УДК [622.822.22:622.693.26]:001.891.573

Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: zinstar@mail.ru;

Олег Петрович Пашковский, мл. науч. сотр.; e-mail: kingston-4@mail.ru;

Виктория Викторовна Волынец, инж.; e-mail: volynetsvika@mail.ua

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81

УСТАНОВИВШИЙСЯ ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ НА ПОРОДНОМ ОТВАЛЕ

Цель. Разработка математической модели процесса самовозгорания породной массы.

Методы. Теоретическое исследование и математическое моделирование процесса самовозгорания породной массы.

Результаты. Рассмотрен установившийся процесс горения, проведен анализ процессов самовозгорания породных отвалов по высоте плоского террикона.

Научная новизна. Математическая модель процесса самовозгорания породной массы позволила выполнить математическое моделирование процессов самовозгорания по высоте плоского террикона.

Практическая значимость. Обоснованы пожаробезопасные параметры формирования породных отвалов.

Ключевые слова: породный отвал; теплообмен; стационарное распределение температуры; теплопроводность; очаг горения; самовозгорание.

Постановка проблемы. Породные отвалы шахт – основной источник загрязнения окружающей среды угледобывающих районов. С ними связано самовозгорание и выделение в атмосферу городов и поселков токсичных газов и пыли, загрязнение воды и почв. Отвалы существуют десятилетиями, но проблема их утилизации до сих пор до конца не решена.

Даже те терриконы, которые кажутся потухшими, на самом деле продолжают тлеть. В их недрах держится высокая температура, к тому же там в избытке накоплен мышьяк, ртуть, цианиды, сера и другие вредные вещества и их соединения. Таким образом, в Донецкой области сосредоточено большое количество горящих потенциально опасных породных отвалов (рис. 1).

Горящие отвалы образуются после извлечения из шахты вмещающих горных пород и выбракованного угля. При наличии провоцирующих факторов, свойственных резко континентальному климату Донбасса, таких как водно-воздушная эрозия, значительные сезонные перепады температур, окислительные реакции и процессы жизнедеятельности бактерий, происходит образование химически активных соединений с повышением температуры пород.

Анализ последних исследований [1–3] показывает, что процесс самовозгорания породной массы недостаточно исследован, несмотря на наличие



Рис. 1. Очаги горения на породном отвале

методик расчетов количества и концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ [1], а также достаточного количества работ по изучению условий самонагрева и возгорания горных пород [2].

Цель исследования. Разработка математической модели процесса самовозгорания породной массы.

Материалы и результаты исследований. Для описания процессов теплообмена в породном отвале с учетом испарения влаги из частиц угля используем уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y'^2} \right) + \frac{q_1 k_1 Z}{\rho_y c_y} \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right) - \frac{q_2 k_2 U}{\rho_y c_y} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right), \quad (1)$$

где a – коэффициент температуропроводности угля, $\text{м}^2/\text{с}$;

r – радиус с центром на оси цилиндра, м ;

y' – координата по высоте породного отвала, отсчитываемая от основания, м ;

q_1 – теплота реакции окисления пирита и угля, Дж/моль ;

k_1 – константа скорости химической реакции при начальной температуре, с^{-1} ;

ρ_y – плотность пирита и угля, кг/м^3 ;

c_y – удельная теплоёмкость пирита и угля, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

E_1 – энергия активации при химической реакции, Дж/моль ;

q_2 – теплота испарения влаги, Дж/моль ;

k_2 – константа скорости испарения влаги при начальной температуре, с^{-1} ;

U – концентрация влаги в угле, моль/м^3 ;

E_2 – энергия активации при испарении влаги, Дж/моль .

Упростим вид уравнения (1), введя в рассмотрение безразмерную температуру, и получим

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) + A_1 \bar{Z} \exp(-\bar{E}_1 / \bar{T}) - A_2 \bar{U} \exp(-\bar{E}_2 / \bar{T}), \quad (2)$$

где $\bar{T} = T/T_0$ – безразмерная температура;

$A_1 = \frac{q_1 k_1 Z_0}{\rho_y c_y T_0}$ – относительная теплота реакции окисления пирита и угля, c^{-1} ;

Z_0 – начальная концентрация кислорода, моль/м³;

$\bar{Z} = Z/Z_0$ – безразмерная концентрация кислорода;

$\bar{E}_1 = E_1/RT_0$ – безразмерная энергия активации при химической реакции;

$A_2 = \frac{q_2 k_2 U_0}{\rho_y c_y T_0}$ – относительная теплота испарения влаги с поверхности частиц угля, c^{-1} ;

U_0 – начальная концентрация влаги, моль/м³;

$\bar{U} = U/U_0$ – безразмерная концентрация влаги;

$\bar{E}_2 = E_2/RT_0$ – безразмерная энергия активации при испарении влаги.

К уравнению (2) добавим начальное и граничные условия. Начальным условием будет

$$\bar{T}(r, y, 0) = 1. \quad (3)$$

Граничные условия для уравнения (2) следующие:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}(0, y, \tau)}{\partial r} = 0; \quad \bar{T}(r_m, y, \tau) = 1; \quad \bar{T}(r, 0, \tau) = 1; \\ \frac{\partial \bar{T}(r, h, \tau)}{\partial y} = \frac{\alpha}{\lambda} [1 - \bar{T}(r, h, \tau)], \end{aligned} \quad (4)$$

где r_m – максимальный радиус породного отвала, м;

λ – коэффициент теплопроводности угля, Вт/(м·К).

Рассмотрим установившийся процесс горения в породном отвале. В данном случае высота отвала при $R_1 > \Delta r$ примет вид

$$0 = a \left(\frac{d^2 \bar{T}}{dy^2} \right) + A_1 \bar{Z} \exp(-\bar{E}_1 / \bar{T}) - A_2 \bar{U} \exp(-\bar{E}_2 / \bar{T}). \quad (5)$$

Решим уравнение (5) относительно производной по высоте породного отвала и получим

$$\frac{d^2 \bar{T}}{dy^2} = -\frac{1}{a} A_1 \bar{Z} \exp(-\bar{E}_1 / \bar{T}) + \frac{1}{a} A_2 \bar{U} \exp(-\bar{E}_2 / \bar{T}). \quad (6)$$

Примем, что при горении температура в породном отвале настолько высокая, что экспоненты в правой части уравнения (6) близки к единице. Тогда уравнение (6) упростится и примет вид

$$\frac{d^2T}{dy^2} = -\frac{1}{a}(A_1 - A_2). \quad (7)$$

Граничные условия для уравнения (7):

$$T(0) = T_0; \quad \frac{dT(h)}{dy} = \frac{\alpha}{\lambda}[T_0 - T(h)]. \quad (8)$$

Интегрируя уравнение (7) по y , получим

$$T(y) = -\frac{1}{2a}(A_1 - A_2)y^2 + by + c, \quad (9)$$

где b и c – константы интегрирования.

Исходя из первого граничного условия (8) константа интегрирования $c = T_0$. Другую константу интегрирования найдем из равенства (8) и получим

$$-\frac{1}{a}(A_1 - A_2)h + b = \frac{\alpha}{\lambda} \left(\frac{1}{2a}(A_1 - A_2)h^2 - bh \right), \quad (10)$$

откуда

$$b - \frac{1}{a}(A_1 - A_2)h = \frac{1 - \alpha h / 2\lambda}{1 + \alpha h / \lambda}. \quad (11)$$

Подставляя найденные формулы для констант интегрирования b и c в решение (9), получим

$$T(y) = -\frac{1}{2a}(A_1 - A_2)y^2 + \frac{1}{a}(A_1 - A_2)yh \frac{1 - \alpha h / 2\lambda}{1 + \alpha h / \lambda} + T_0. \quad (12)$$

На рис. 2 представлены результаты расчёта по формуле (12) стационарного распределения температуры по высоте породного отвала при отсутствии теплообмена с внешней средой и при интенсивном теплообмене. При расчёте принято $P = (A_1 - A_2)h^2/aT_0 = 8$.

Анализ результатов расчёта показывает, что при отсутствии теплообмена с внешней средой максимальная температура в породном отвале может подняться до $T_m/T_0 = 5$, что соответствует температуре $T_m = 1200$ °С. В то же время при большом теплообмене с внешней средой, что соответствует действительности, максимальная температура будет равна $T_m/T_0 = 3$, что соответствует температуре $T_m = 600$ °С.

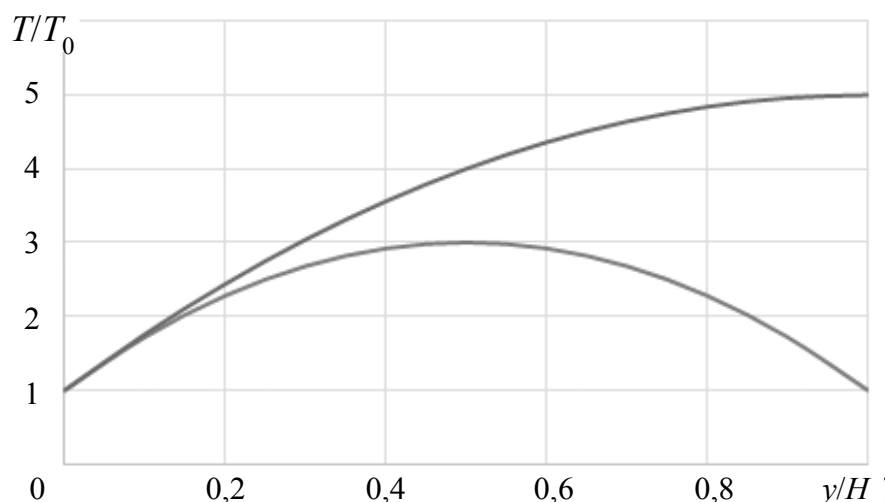


Рис. 2. Стационарное распределение температуры по высоте породного отвала при отсутствии теплообмена с внешней средой (верхняя кривая, $\alpha=0$) и при интенсивном теплообмене (нижняя кривая, $\alpha \rightarrow \infty$)

В интенсивном теплообмене с внешней средой ($\alpha \rightarrow \infty$) формула (12) упрощается и принимает вид

$$T(y) = \frac{1}{2a}(A_1 - A_2)y(h - y) + T_0. \quad (13)$$

В этом случае максимальная температура будет равна

$$T_m = \frac{1}{8a}(A_1 - A_2)h^2 + T_0. \quad (14)$$

Выполненные исследования дают возможность обосновать пожаробезопасные параметры по формированию породных отвалов угольных шахт.

Выводы. Разработана математическая модель процесса самовозгорания породной массы, которая позволила выполнить математическое моделирование процессов самовозгорания по высоте плоского террикона.

Рассмотрен установившийся процесс горения на породном отвале. Анализ результатов расчета показал, что при отсутствии теплообмена с внешней средой максимальная температура в породном отвале может подняться до $T_m/T_0 = 5$, что соответствует температуре $T_m = 1200$ °С. В то же время при большом теплообмене с внешней средой, что соответствует действительности, максимальная температура будет равна $T_m/T_0 = 3$, что соответствует температуре $T_m = 600$ °С.

Список литературы / References

1. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкостей и газов / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.
Loytsyanskiy, L.G. *Mekhanika zhidkostey i gazov* [Mechanics of liquids and gases]. Moscow, Drofa Publ., 2003, 840 p.
2. Голынская, Ф.А. Методика исследования самовозгорания углей в пластах / Ф.А. Голынская // Геология угольных месторождений: межвуз. науч. тематич. сб. – Екатеринбург, 2001. – С. 268 – 270.
Golynskaya, F.A. *Metodika issledovaniya samovozgoraniya ugley v plastakh* [Methodology of investigation of coal spontaneous combustion in seams] *Geologiya ugol'nykh mestorozhdeniy: mezhvuz. nauch. tematich. sb.* [Geology of coal deposits: interuniversity scientific and subject collection]. Yekaterinburg, 2002, pp. 274 – 281.
3. Пашковский, П.С. Интенсивность выделения токсичных газообразных веществ горящими породными отвалами / П.С. Пашковский, Г.Б. Тында // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2006. – Вып. 43. – С. 69 – 78.
Pashkovskiy, P.S. Tynda, G.B. *Intensivnost' vydeleniya toksichnykh gazoobraznykh veshchestv goryashchimi porodnymi otvalami* [Intensity of release of toxic gaseous substances by burning waste rock piles]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2006, issue 43, pp. 69 – 78.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Г.П. Стариковым
Дата поступления рукописи 07.11.2019

Igor Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: zinstar@mail.ru;
Oleg Petrovich Pashkovskiy, junior scientific associate; e-mail: kingston-4@mail.ru;
Viktoria Viktorovna Volynets, engineer; e-mail: volynetsvika@mail.ua
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-81

STEADY-STATE COMBUSTION PROCESS AT A WASTE ROCK PILE

Purpose. Development of a mathematical model of spontaneous combustion of the rock mass.

Methods. Theoretical investigation and mathematical modeling of the spontaneous combustion process of the rock mass.

Results. The steady process of combustion has been considered, the analysis of the spontaneous combustion processes of the waste rock piles along the height of the flat spoil heap has been conducted.

Scientific novelty. The mathematical model of the spontaneous combustion process of the rock mass has allowed conducting the mathematical modeling of the spontaneous combustion processes along the height of the flat spoil heap.

Practical value. The fire-safe parameters of the waste rock piles formation have been substantiated.

Keywords: waste rock pile; heat exchange; steady-state distribution of the temperature; heat conductivity; heat source; spontaneous combustion.

УДК 621.316.54

Александр Петрович Ковалёв, д-р техн. наук, науч. сотр.; e-mail: abrecap@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-46*

Виктория Викторовна Якимишина, канд. техн. наук, доцент; e-mail: yvsm@list.ru

Ольга Андреевна Сапоненко, магистрант; e-mail: saponenko.olga.andreevna@gmail.com

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-06

НАДЕЖНОСТЬ ЗАЩИТНЫХ КОММУТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

Цель. Определить влияние интервала времени между диагностическими проверками автоматической системы отключения фидерного защитного коммутационного аппарата на обеспечение надежности узла нагрузки промышленного предприятия.

Методы. Моделирование надежности защитного коммутационного аппарата в динамическом режиме с использованием марковских случайных процессов с дискретным числом состояний и непрерывным временем.

Результаты. Для конкретного узла нагрузки промышленного предприятия установлено, что если контролировать работоспособность системы автоматического отключения фидерного защитного коммутационного аппарата два раза в год вместо одного, то количество аварийных отключений секции шин трансформаторной подстанции снизится в 3,1 раза.

Научная новизна. Получена аналитическая зависимость вероятности безотказной работы в течение времени действия защитного коммутационного аппарата, который может находиться в трех состояниях с учетом диагностики его автоматической системы отключения.

Практическая значимость. Полученные аналитические зависимости позволяют оценить и обосновать эффективность разработанных рекомендаций по изменению сроков диагностики автоматической системы отключения защитных коммутационных аппаратов, эксплуатирующихся в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: надежность; защитный коммутационный аппарат; обрыв цепи; отказ в срабатывании; случайный процесс; релейная защита; диагностика.

Постановка проблемы. Наиболее опасен для систем электроснабжения и потребителей электрической энергии на промышленных предприятиях динамический режим, так как крупные аварии на предприятиях происходят тогда, когда случайным образом появляется короткое замыкание (КЗ) в защищаемом элементе сети, а автоматическая система отключения ближайшего к месту повреждения защитного коммутационного аппарата, через который прошел сквозной аварийный ток, оказалась в поврежденном состоянии. Между проводниками различных фаз появляется жидкая перемычка, образованная из расплавленного металла проводников, и под воздействием динамических процессов в сети происходит электрический взрыв. Это приводит к выбросу из зоны дугового разряда нагретых металлических частиц, которые способствуют возгоранию расположенной рядом пожароопасной среды [1]. Поэтому проблема, связанная с оценкой влияния

диагностики системы автоматического автоматического отключения фидерного защитного коммутационного аппарата на обеспечение надежности узла нагрузки промышленного предприятия, весьма актуальна.

Состояние вопроса. Автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата – это последовательная цепь от клемм трансформатора тока до силовых контактов выключателя, в том числе релейной защиты, катушки отключения и привода выключателя.

Отказы защитных коммутационных аппаратов типа «обрыв цепи» приводят к аварийным отключениям потребителей электрической энергии и расстраивают технологический процесс.

Отключаемые КЗ и замыкания на землю в сети ложные, излишние срабатывания релейной защиты, ошибки обслуживающего и эксплуатирующего персонала, при которых происходит аварийное отключение защитного коммутационного аппарата автоматически или с помощью оперативного персонала – будем относить к отказам «обрыв цепи».

К отказам в срабатывании защитного коммутационного аппарата будем относить такие повреждения (КЗ в элементе сети в зоне действия ее релейной защиты), при которых через него проходит сквозной аварийный ток, а автоматическая система отключения не срабатывает.

Предположим, что система отключения защитного коммутационного аппарата может выходить из строя только тогда, когда она находится в режиме ожидания [2]. Если к моменту возникновения повреждения в сети, на которое должна реагировать релейная защита, автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата находилась в исправном состоянии, то маловероятен ее выход из строя в режиме «тревоги».

Например, при КЗ в линии L_1 узла нагрузки промышленного предприятия (рис. 1) произойдет отключение поврежденной линии с помощью релейной защиты коммутационного аппарата 1, что приведет к обесточиванию потребителя электрической энергии, в результате этого прерывается рабочий цикл технологической установки.

Если при КЗ в линии L_1 откажет в срабатывании автоматическая система отключения коммутационного аппарата 1, то поврежденную линию с выдержкой времени отключит релейную защиту вводного коммутационного аппарата 10. Автоматический ввод резерва на секционном коммутационном аппарате 9 в этом случае не срабатывает. Это приведет к обесточиванию не только потребителя электрической энергии, который получает ее по линии L_1 , но и всех потребителей секции 10 кВ. Такое событие расстроит технологический процесс на предприятии с вытекающими из этого нежелательными последствиями.

Известные научные публикации не дают исчерпывающих ответов на вопрос, каким образом и в какой степени диагностика автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата влияет на обеспечение надежности узлов нагрузки промышленного предприятия.

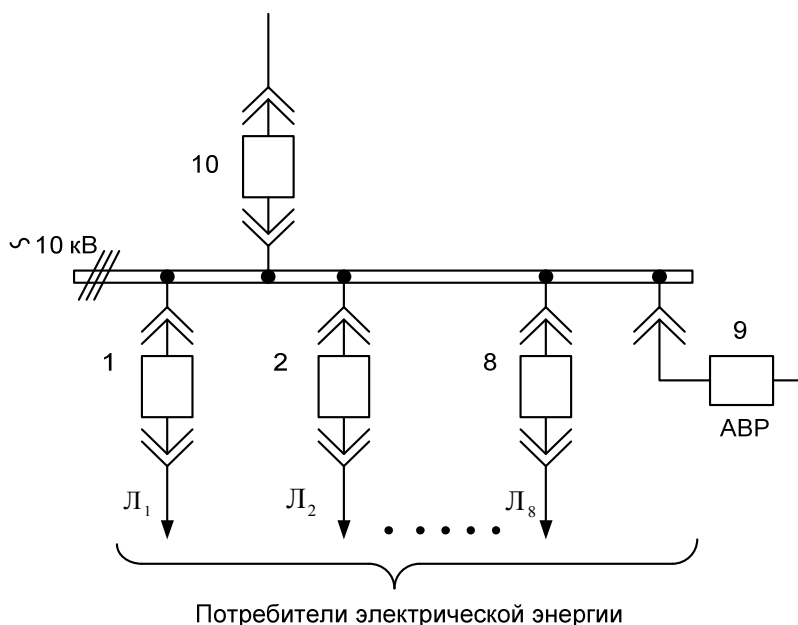


Рис. 1. Узел нагрузки промышленного предприятия

Цель исследования – оценить влияние интервала времени между диагностическими проверками автоматической системы отключения фидерного защитного коммутационного аппарата на обеспечение надежности узла нагрузки промышленного предприятия.

Результаты исследования. Изменение состояния автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата представим в виде двух однородных марковских процессов: $\xi(t)$ и $\alpha(t)$ [3]. Пусть $\xi(t)$ в течение времени t может находиться в двух дискретных состояниях: 0 – в сети не наблюдаются события, которые могли бы привести к аварийному отключению защитного коммутационного аппарата; 1 – произошло КЗ в элементе сети, сработала релейная защита коммутационного аппарата, и он отключил соответствующий потребитель электрической энергии (отказ «обрыв цепи»).

Обозначим параметры процесса $\xi(t)$: λ_o – интенсивность аварийных отключений поврежденных элементов сети, которые находились в зоне действия релейной защиты коммутационного аппарата (отказ «обрыв цепи»); μ_o – интенсивность обнаружения и ремонт (замена) поврежденного элемента сети, включение в работу аварийно-отключившегося коммутационного аппарата.

Индекс «о» указывает на то, что учтены повреждения в сети, которые приводят к аварийному отключению защитного коммутационного аппарата, ближайшего к месту КЗ, через который прошел сквозной аварийный ток и привел в действие релейную защиту.

События в защищаемой сети, при которых через защитный коммутационный аппарат проходит аварийный ток КЗ, а его релейная защита не срабатывает, представим в виде процесса $\alpha(t)$ с двумя дискретными состояниями и непрерывным временем. Обозначим: 0 – в сети не наблюдается

событие, в результате появления которого отказывает в срабатывании автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата; 1 – произошло КЗ в элементе сети; через защитный коммутационный аппарат, ближайший к месту повреждения, прошел аварийный ток, а его автоматическая система отключения оказалась в неработоспособном состоянии – произошел отказ в срабатывании.

Параметры процесса $\alpha(t)$ следующие: λ_s – интенсивность отказов в срабатывании автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты; μ_s – интенсивность обнаружения и восстановления работоспособности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата и введения его в эксплуатацию. Индекс s указывает на то, что учтены отказы в срабатывании автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата.

Интервал времени между диагностическими проверками работоспособности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата обозначим через Θ . Диагностические проверки надежны. Это означает, что при диагностических проверках повреждения в автоматической системе отключения коммутационного аппарата будут обязательно выявлены и работоспособность ее будет полностью восстановлена.

Время диагностики обозначим через δ . Время $\delta \ll \Theta$, т.е. $\Theta + \delta \cong \Theta$.

Если известны параметры процессов: $\xi(t)$ и $\alpha(t)$, т.е. λ_o , μ_o , λ_s , μ_s и задан интервал времени между диагностикой автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата Θ , то следует определить:

$P(t)$ – вероятность нахождения коммутационного аппарата в течение времени t в состоянии $e_0(0,0)$, т.е. в режиме ожидания;

$q_o(t)$ – вероятность нахождения защитного коммутационного аппарата в течение времени t в состоянии $e_1(1,0)$, т.е. вероятность отключения от сети поврежденного электрооборудования при появлении КЗ в течение времени t в зоне действия его релейной защиты;

$q_s(t)$ – вероятность нахождения защитного коммутационного аппарата в течение времени t в состоянии $e_2(0,1)$, т.е. вероятность отказов в срабатывании системы автоматического отключения i -го защитного коммутационного аппарата, при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты в течение времени t ;

$A(\tau)$ – вероятность нахождения автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата в режиме ожидания для некоторого произвольно выбранного интервала времени τ ;

$A(\infty)$ – коэффициент готовности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата;

K_s – коэффициент эффективности разработанных рекомендаций.

Решение поставленной задачи

Совокупность двух независимых процессов $\xi(t)$ и $\alpha(t)$ рассмотрим как один однородный марковский процесс с тремя дискретными состояниями и непрерывным временем.

В любой момент времени автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата может находиться в одном из трех состояний $E\{e_0(0,0), e_1(1,0), e_2(0,1)\}$, где:

$e_0(0,0)$ – в сети не наблюдается событие, которое могло бы привести к аварийному отключению защитного коммутационного аппарата (отказу «обрыв цепи»); в сети не наблюдается событие, в результате появления которого откажет автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата, т.е. это означает, что автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата находится в режиме ожидания;

$e_1(1,0)$ – произошло КЗ в элементе сети, сработала релейная защита защитного коммутационного аппарата, и он отключил соответствующий потребитель электрической энергии, произошел отказ «обрыв цепи»; в сети не наблюдается событие, в результате которого откажет автоматическая система отключения защитного коммутационного аппарата;

$e_2(0,1)$ – в сети не наблюдается событие, которое могло бы привести к аварийному отключению защитного коммутационного аппарата (отказу «обрыв цепи»); произошло КЗ в защищаемом элементе сети, через защитный коммутационный аппарат прошел сквозной аварийный ток, а его автоматическая система отключения в это время находилась в неработоспособном состоянии – произошел ее отказ.

Пусть в начальный момент времени $\xi(t)=0$ и $\alpha(t)=0$.

Величина $o(\Delta t)$ означает, что два перехода из одного состояния в другое – это бесконечно малая величина по сравнению с Δt .

Используя граф вероятностей переходов (рис. 2) формулы для определения $P(t)$, $q_o(t)$, $q_s(t)$ можно получить из системы линейных дифференциальных уравнений, записанных в матричной форме:

$$\begin{bmatrix} \dot{P}(t) \\ \dot{q}_o(t) \\ \dot{q}_s(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P(t) \\ q_o(t) \\ q_s(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -(\lambda_o + \lambda_s) & \lambda_o & \lambda_s \\ \mu_o & -\mu_o & 0 \\ \mu_s & 0 & -\mu_s \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Система (1) решается при начальных условиях: $P(0)=1$, $q_o(0)=q_s(0)=0$.

Используя преобразование Лапласа [4], систему линейных дифференциальных уравнений (1) преобразуем в систему из трех алгебраических уравнений вида

$$\begin{bmatrix} P(s) \\ q_o(s) \\ q_s(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s + \lambda_o + \lambda_s & -\lambda_o & -\lambda_s \\ -\mu_o & s + \mu_o & 0 \\ -\mu_s & 0 & s + \mu_s \end{bmatrix}^{-1}. \quad (2)$$

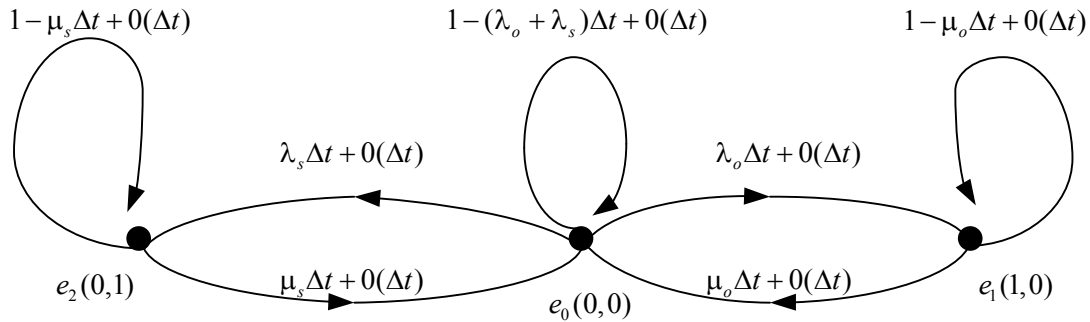


Рис. 2. Граф вероятностей переходов системы защитного коммутационного аппарата в течение времени Δt

Из системы алгебраических уравнений (2) находим

$$P(s) = \frac{(s + \mu_o)(s + \mu_s)}{s[s^2 + s(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + (\mu_o\mu_s + \lambda_o\mu_s + \lambda_s\mu_o)]}; \quad (3)$$

$$q_o(s) = \frac{\lambda_o(s + \mu_s)}{s[s^2 + s(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + (\mu_o\mu_s + \lambda_o\mu_s + \lambda_s\mu_o)]}; \quad (4)$$

$$q_s(s) = \frac{\lambda_s(s + \mu_o)}{s[s^2 + s(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + (\mu_o\mu_s + \lambda_o\mu_s + \lambda_s\mu_o)]}. \quad (5)$$

Формулы (3) – (5) представим в виде

$$P(s) = \frac{(s + \mu_o)(s + \mu_s)}{s(s - s_1)(s - s_2)}; \quad (6)$$

$$q_o(s) = \frac{\lambda_o(s + \mu_s)}{s(s - s_1)(s - s_2)}; \quad (7)$$

$$q_s(s) = \frac{\lambda_s(s + \mu_o)}{s(s - s_1)(s - s_2)}, \quad (8)$$

где

$$s_{1,2} = 0,5 \left\{ -(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) + [(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o\mu_s + \lambda_o\mu_s + \lambda_s\mu_o)]^{\frac{1}{2}} \right\}; \quad (9)$$

$$s_2 = 0,5 \left\{ -(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s) - \left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{1/2} \right\}. \quad (10)$$

Применяя обратное преобразование Лапласа к функциям (6) – (8), получим

$$P(t) = \frac{\mu_o \mu_s}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{\left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{1/2}} \times \\ \times \left[\frac{(s_1 + \mu_o)(s_1 + \mu_s)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{(s_2 + \mu_o)(s_2 + \mu_s)}{s_2} e^{s_2 t} \right]; \quad (11)$$

$$q_o(t) = \frac{\lambda_o \mu_s}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{\left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{1/2}} \times \\ \times \left[\frac{\lambda_o (s_1 + \mu_s)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{\lambda_o (s_2 + \mu_s)}{s_2} e^{s_2 t} \right]; \quad (12)$$

$$q_s(t) = \frac{\lambda_s \mu_o}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{\left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{1/2}} \times \\ \times \left[\frac{\lambda_s (s_1 + \mu_o)}{s_1} e^{s_1 t} - \frac{\lambda_s (s_2 + \mu_o)}{s_2} e^{s_2 t} \right], \quad (13)$$

где

$$\lambda_o = \frac{n_o}{NT}, \quad (14)$$

n_o – количество зафиксированных аварийных отключений защитного коммутационного аппарата за время наблюдения;

T – время наблюдения за эксплуатацией защитного коммутационного аппарата;

N – количество защитных коммутационных аппаратов, за которыми было установлено наблюдение;

$$\mu_o = \frac{1}{\tilde{t}_o}, \quad (15)$$

\tilde{t}_o – среднее время обнаружения аварийно-отключившегося от сети электрооборудования, его восстановления и включение защитного коммутационного аппарата в работу;

$$\lambda_s = \frac{n_s}{NT}, \quad (16)$$

n_s – количество выявленных отказов в срабатывании автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата при появлении тока КЗ в зоне действия релейной защиты за время наблюдения.

Интенсивность обнаружения повреждений в автоматической системе отключения защитного коммутационного аппарата при заданном интервале времени между диагностиками Θ можно определить, пользуясь формулой [5]

$$\mu_s = \frac{1}{\Theta - \frac{1}{\lambda_s}(1 - e^{-\lambda_s \Theta})}. \quad (17)$$

В том случае, если выполнено условие

$$\lambda_s \Theta < 0,1, \quad (18)$$

формула (17) примет вид

$$\mu_s = \frac{2}{\lambda_s \Theta^2}. \quad (19)$$

Для определения вероятности нахождения автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата в режиме ожидания для некоторого конечного интервала времени τ необходимо $P(t)$ суммировать по всему заданному интервалу времени, а затем полученный результат разделить на него

$$A(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} P(t) dt. \quad (20)$$

Подставим в формулу (20) формулу (11), получим

$$A(\tau) = \frac{\mu_s \mu_o}{\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o} + \frac{1}{\left[(\mu_o + \mu_s + \lambda_o + \lambda_s)^2 - 4(\mu_o \mu_s + \lambda_o \mu_s + \lambda_s \mu_o) \right]^{\frac{1}{2}} \tau} \times \left[\frac{(s_1 + \mu_o)(s_1 + \mu_s)}{s_1^2} (1 - e^{s_1 \tau}) - \frac{(s_2 + \mu_o)(s_2 + \mu_s)}{s_2^2} (1 - e^{s_2 \tau}) \right]. \quad (21)$$

Коэффициент готовности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата в установившемся режиме с учетом формулы (17) будет иметь вид

$$A(\infty) = \frac{\mu_o}{\lambda_o + \mu_o (\lambda_s \Theta + e^{-\lambda_s \Theta})}. \quad (22)$$

Ожидаемый эффект ($K_s > 1$) после изучения и анализа причин выхода из строя автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата и изменения сроков ее диагностики можно оценить следующим образом:

$$K_s = \frac{[\lambda_o + \mu_o (\lambda_s \Theta + e^{-\lambda_s \Theta} - 1)] [\lambda_o + \mu_o (\lambda_s \Theta_1 + e^{-\lambda_s \Theta_1})]}{[\lambda_o + \mu_o (\lambda_s \Theta + e^{-\lambda_s \Theta})] [\lambda_o + \mu_o (\lambda_s \Theta_1 + e^{-\lambda_s \Theta_1} - 1)]}, \quad (23)$$

где Θ – регламентируемый существующими нормативными документами интервал времени между диагностическими проверками работоспособности автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата;

Θ_1 – предлагаемый интервал времени между диагностическими проверками автоматической системы отключения защитного коммутационного аппарата после анализа причин отказов ее в срабатывании при появлении КЗ в зоне действия токовой защиты.

Если выполняется условие (18), тогда формулы (22) и (23) примут вид

$$A(\infty) = \frac{2\mu_o}{2\lambda_o + \mu_o (2 + \lambda_s^2 \Theta^2)}; \quad (24)$$

$$K_s = \frac{(2\lambda_o + \mu_o \lambda_s^2 \Theta^2) [2\lambda_o + \mu_o (2 + \lambda_s^2 \Theta_1^2)]}{(2\lambda_o + \mu_o \lambda_s^2 \Theta_1^2) [2\lambda_o + \mu_o (2 + \lambda_s^2 \Theta^2)]}. \quad (25)$$

Формулы (22) – (25) позволяют оценить в установившемся режиме готовность к работе системы автоматического отключения защитных коммутационных аппаратов и эффективность ее диагностики при эксплуатации их в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Пример. В результате наблюдения по плану [NMT] в течение $T = 12$ лет за эксплуатацией защитных коммутационных аппаратов ($N = 8$) секции шин трансформаторной подстанции 110/10 кВ одного из промышленных предприятий (см. рис. 1) получена следующая информация: произошло 14 случаев аварийного отключения коммутационных аппаратов 1–8. Все выявленные аварийные отключения защитных коммутационных аппаратов отнесены к отказам типа «обрыв цепи» ($n_o = 14$).

Среднее время обнаружения поврежденного элемента сети, его ремонт или замена и включение вновь защитного коммутационного аппарата в работу составило 2,3 ч. Количество выявленных отказов в срабатывании защитных коммутационных аппаратов при появлении КЗ в зоне действия его релейной защиты – девять случаев ($n_s = 9$). Диагностические проверки автоматической

системы отключения защитного коммутационного аппарата проводили ежегодно ($\Theta = 8760$ ч).

Определить, во сколько раз снизится количество аварийных отключений секции шин 10 кВ (см. рис. 1), если диагностику системы отключений защитных коммутационных аппаратов 1–8 проводить через $\Theta_1 = 4380$ ч.

Решение. Используя исходные данные примера, формулы (14) – (16), находим:

$$\lambda_o = \frac{n_o}{NT} = 0,000133 \text{ ч}^{-1}; \mu_o = \frac{1}{\tilde{t}_o} = 0,435 \text{ ч}^{-1}; \lambda_s = \frac{n_s}{NT} = 0,0000856 \text{ ч}^{-1}.$$

Значения $\lambda_o, \mu_o, \lambda_s, \Theta = 8760$ ч, $\Theta_1 = 4380$ ч подставим в формулу (23) и в результате вычислений получим: $K_s = 3,1$. Этот результат расчетов означает, что если контролировать работоспособность системы автоматического отключения защитных коммутационных аппаратов 1–8 (см. рис. 1) два раза в год с интервалом времени $\Theta_1 = 4380$ ч, то количество аварийных отключений секции шин 10 кВ снизится в 3,1 раза.

Список литературы / References

1. Ковалёв, А.П. О причастности коротких замыканий в электрической проводке 0,4/0,22 кВ к пожарам в электрифицированных помещениях / А.П. Ковалёв, И.А. Бершадский, А.В. Згарбул // Промышленная энергетика. – 2018. – № 4. – С. 60 – 65.

Kovalyov, A.P., Bershadskiy, I.A., Zgarbul, A.V. *O prichastnosti korotkikh замыkaniy v elektricheskoy provodke 0,4/0,22 kV k pozharam v elektrifitsirovannykh pomeshcheniyakh* [On complicity of the 0.4/0.22 kV electrical wiring short circuits in fires in electrified premises]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2018, no. 4, pp. 60 – 65.

2. Ковалёв, А.П. О надежности защитных коммутационных аппаратов, которые эксплуатируются в системах электроснабжения 10 – 0,4 кВ промышленных предприятий / А.П. Ковалёв, И.И. Москвина, А.А. Сорочка // Промышленная энергетика. – 2019. – № 3. – С. 32 – 37.

Kovalyov, A.P., Moskvina, I.I., Sorochka, A.A. *O nadyezhnosti zashchitnykh kommutatsionnykh apparatov, kotoryye ekspluatiruyutsya v sistemakh elektrosnabzheniya 10 – 0,4 kV promyshlennykh predpriyatiy* [On reliability of safe switching devices operating in the 10 – 0.4 kV electrical power supply systems of industrial enterprises]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, 2019, no. 3, pp. 32 – 37.

3. Дьяков, Б.Н. Случайные процессы / Б.Н. Дьяков, В.Ф. Ковязин, А.Н. Соловьев. – СПб.: Лань, 2013. – 640 с.

D'yakov, B.N. Kovyazin, V.F., Solov'yov, A.N. *Sluchaynyye protsessy* [Stochastic processes]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2013, 640 p.

4. Бронштейн, И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 2018. – 610 с.

Bronshteyn, I.N., Semendyayev, K.A. *Spravochnik po matematike. Dlya inzhenerov i uchashchikhsya vuzov* [Mathematics handbook. For engineers and students of high educational institutions]. Moscow, Nauka Publ., 1986, 544 p.

5. Белоусенко, И.В. Влияние надежности оборудования газораспределительных пунктов на взрывобезопасность газифицированных объектов / И.В. Белоусенко, А.П. Ковалев, И.И. Лехтман // Промышленная энергетика. – М., 2011. – № 11. – С. 48 – 54.

Belousenko, I.V., Kovalyov, A.P., Lekhtman, I.I. *Vliyaniye nadyezhnosti oborudovaniya gazoraspredelel'nykh punktov na vzyrovbezopasnost' gazifitsirovannykh ob'yektov* [Influence of reliability of equipment of gas-distributing points on explosion safety of objects with gas supply]. *Promyshlennaya energetika – Industrial energetics*, Moscow, 2011, no. 11, pp. 48 – 54.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 13.02.2020

Aleksandr Petrovich Kovalyov, Dr. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: abrecap@mail.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-46

Viktoria Viktorovna Yakimishina, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: yvsm@list.ru

Olga Andreyevna Saponenko, master’s student; e-mail: saponenko.olga.andreevna@gmail.com

The State Educational Institution of Higher Occupational Education
“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-06

RELIABILITY OF PROTECTIVE SWITCHING DEVICES

Purpose. To determine the influence of a time interval between the diagnostic tests of automatic shutdown system of the feeder protective switching device on ensuring the safety of load center of an industrial enterprise.

Methods. Modeling of reliability of the protective switching device in dynamic mode with application of the Markovian processes with digital number of states and continuous time.

Results. It has been established for the particular load center of the industrial enterprise that if the functional state of the automatic shutdown system of the feeder protective switching device is controlled twice a year instead of once then the number of emergency shutdowns of the transformer substation busbar section will reduce by 3.1.

Scientific novelty. The analytical dependence has obtained for probability of the non-failure operation during the operation time of the protective switching device that may exist in three states taking into account the diagnostics of its automatic shutdown system.

Practical value. The obtained analytical dependences make it possible to evaluate and to substantiate the efficiency of the developed guidelines on rescheduling the periods of diagnostics of the automatic shutdown system of the protective switching devices being operated in the power supply systems of the industrial enterprises.

Keywords: *reliability; protective switching device; electric discontinuity; failure to operate; random process; relay protection; diagnostics.*

УДК 614.8 "363"

Анатолий Федорович Иваненко, нач. отд.; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;

Петр Евгеньевич Мухин, канд. техн. наук, науч. сотр.; e-mail: petr63203@gmail.com

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +(38062) 332-78-44*

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ БЕЗОПАСНОГО ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ

Цель. Обоснование и выбор эффективных подходов к оценке риска чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах для обеспечения их безопасной эксплуатации.

Методика. Информационно-аналитические исследования методов оценки риска.

Результаты. Исследованы и проанализированы методы оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, определены проблемы их практического использования и предложены пути решения этих проблем.

Научная новизна. Обоснованы требования к обеспечению безопасного функционирования опасного производственного объекта на всех стадиях его жизненного цикла.

Практическая значимость. Предложенный подход к созданию централизованной базы данных, установлению показателей приемлемого риска, организации обучения специалистов по анализу и оценке риска позволяют повысить эффективность анализа опасностей и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах для заблаговременного предупреждения угроз жизни и здоровью персонала, разрушения технических устройств, зданий и сооружений, а также нанесения вреда окружающей среде.

Ключевые слова: методология оценки риска; чрезвычайная ситуация; опасный производственный объект; статистические данные; приемлемый риск.

Постановка проблемы. Методологическое обеспечение анализа опасностей и оценки риска – это теоретические, аналитические и математические исследования, позволяющие идентифицировать опасности, возникающие при эксплуатации опасного производственного объекта, определить вероятность и причины возникновения чрезвычайных ситуаций, последующего их развития и ожидаемых негативных воздействий на персонал и/или население, технические устройства и/или объекты, окружающую среду.

Однако рекомендованная к практическому применению в различных источниках методология оценки риска имеет ряд недостатков, которые в значительной мере влияют на оценку обоснованности, достаточности и эффективности предусмотренных мер безопасности на опасном производственном объекте.

В связи с этим актуальна разработка метода, позволяющего эффективно и достоверно оценивать риск чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах.

Анализ последних исследований и публикаций. Важная задача в рамках осуществления государственной политики Донецкой Народной Республики в области охраны труда и промышленной безопасности – анализ опасностей и оценка риска чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах.

В соответствии с требованиями Закона «О промышленной безопасности» и нормативных правовых актов анализируют опасности и оценивают риски чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте при разработке [1 – 5]:

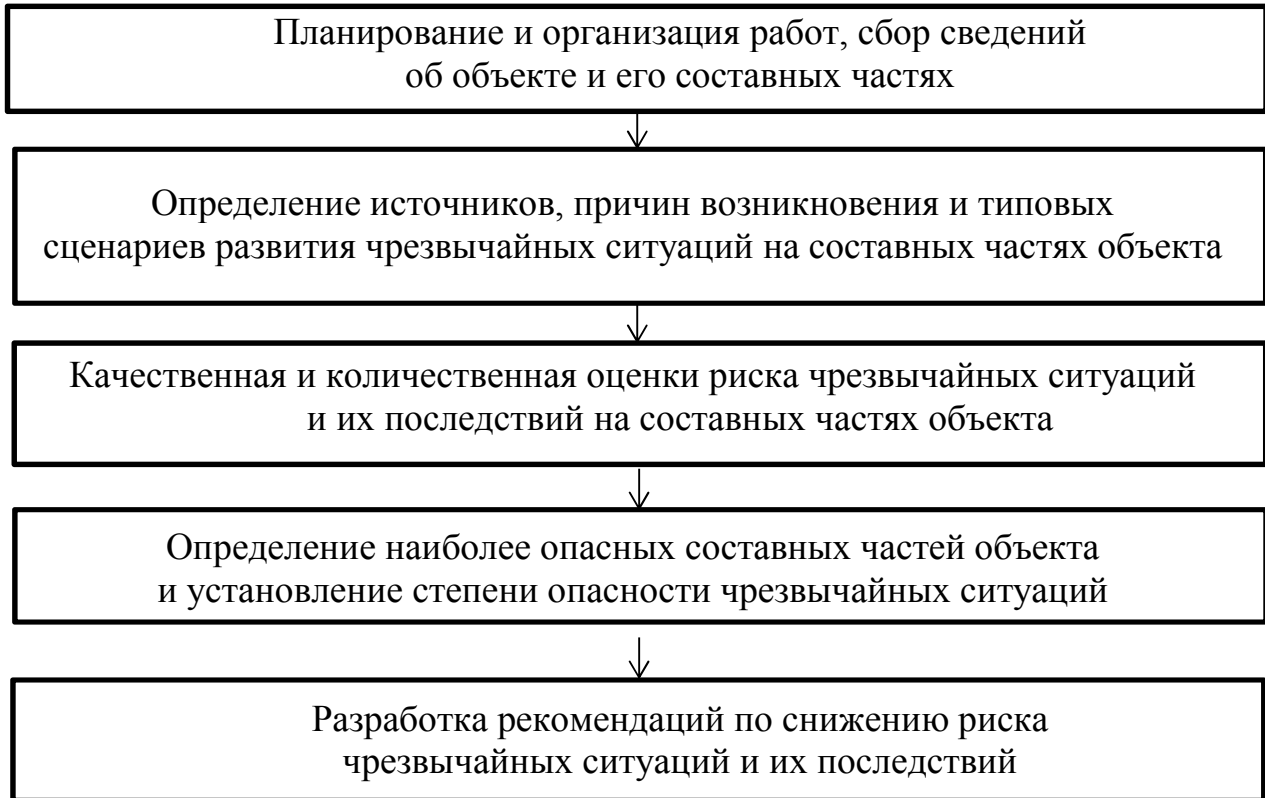
- проектной документации на строительство, эксплуатацию, реконструкцию, техническое перевооружение, капитальный ремонт, консервацию и ликвидацию опасного производственного объекта;
- декларации промышленной безопасности;
- обоснования безопасности;
- планов мероприятий по снижению риска, локализации и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, а также других документов в составе документационного обеспечения систем управления охраной труда и промышленной безопасностью.

Материалы и результаты исследований. В процессе научных исследований был осуществлен сбор сведений об опасных производственных объектах I и II класса опасности различных отраслей промышленности Донецкой Народной Республики, определены потенциальные источники опасностей и возможные причины чрезвычайных ситуаций, рассмотрены типовые сценарии развития чрезвычайных ситуаций, а также разработан комплексный подход к анализу опасностей и оценке риска чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте (см. рисунок).

В настоящее время рекомендованы следующие, основанные на определении вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций, методы комплексного подхода к анализу опасностей и оценке риска:

- базирующиеся на статистических данных о надежности работы технических устройств, сведениях об уровне травматизма и профзаболеваемости производственного персонала, а также о параметрах функционирования окружающей среды, соответствующие специфике опасного производственного объекта или виду деятельности предприятия;
- логические методы анализа;
- имитационные модели возникновения чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте как сложной биосоциотехнической системе;
- экспертные оценки специалистов в области охраны труда и промышленной безопасности.

Установлено, что в процессе оценки риска конкретного опасного производственного объекта проявляется ряд недостатков вышеуказанных методик при их практическом применении, которые приведены ниже.



Блок-схема комплексного подхода к анализу опасностей и оценке риска чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте

Метод проведения оценки риска на основании статистических данных в большинстве случаев не имеет удовлетворительного информационного обеспечения, то есть сбор достоверных статистических данных и сведений о функционировании опасного производственного объекта и его составных частей – достаточно трудоемкая задача. Отсутствие объективных сведений о причинах происшедших чрезвычайных ситуаций значительно увеличивает погрешность и неточность количественных показателей риска, рассчитанных с их использованием. Как правило, информация, имеющаяся в общедоступных источниках, носит поверхностный характер, так как необходимые сведения о чрезвычайных ситуациях и причинах их возникновения либо отсутствуют, либо недостаточны.

Логические методы анализа (например, «Анализ вида и последствий отказов», «Анализ опасности и работоспособности», «Анализ дерева отказов», «Анализ дерева событий», «Анализ барьеров безопасности» и т.д.) просты в применении, наглядны и понятны, однако показатели, используемые при построении данных логических цепочек, зачастую выбирают субъективно, так как точная информация о распределении интенсивности отказа элемента системы или условной вероятности того или иного события определены не для всех типовых сценариев развития чрезвычайных ситуаций.

Метод оценки риска с использованием имитационных моделей возникновения чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте

как сложной биосоциотехнической системе – расчетно-аналитический метод. Применение для оценки риска данного метода осуществляется с использованием программного обеспечения, в основу которого заложена имитационная модель процесса возникновения чрезвычайных ситуаций в сложных биосоциотехнических системах. То есть для конкретного рассматриваемого объекта создается его модель и анализируется функционирование этой модели в условиях, приближенных к проектным решениям. В результате полученных данных оценивают опасность объекта для конкретных условий. Однако, как правило, такие имитационные модели не учитывают фактор влияния окружающей среды на процесс возникновения чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте (например, для угольной шахты существенное значение имеют такие природные явления, как внезапные выбросы угля, породы и газа, суфлярные выделения метана и т.п.). Применение данного метода на практике трудозатратно и достаточно сложно, хотя, как правило, наиболее эффективно и отличается точностью получаемых результатов.

Метод экспертных оценок (метод Дельфи) за счет учета мнения специалистов в области охраны труда и промышленной безопасности предоставляет возможность в итоге получить качественные показатели риска. Однако этот метод является недостаточно эффективным, так как существенное влияние на результат оказывает субъективный фактор, поскольку конкретное мнение каждого специалиста по причинам и следствиям рассматриваемой чрезвычайной ситуации не всегда абсолютно правильно.

Таким образом, в процессе оценки риска чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте наиболее приемлемо применение количественного вероятностного подхода с использованием метода оценки риска на основании статистических исходных данных. Этот подход дает возможность определить риск и, за счет сравнения с критериями приемлемого риска чрезвычайных ситуаций, сделать заключение об уровне опасности объекта, достаточности и эффективности мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте.

Основу оценки риска составляет определение вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте и ожидаемого ущерба от ее негативных последствий, которые непосредственно влияют на окончательный результат.

Обычно риск R определяют вероятностью возникновения чрезвычайной ситуации P и возможным ущербом U [2, 4]:

$$R=PU. \quad (1)$$

В случае, когда риск R рассматривают для n -го числа возможных аварийных ситуаций, то выражение для определения риска будет следующим:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i U_i. \quad (2)$$

Вероятность P и ущерб U определяют параметры системы, ее текущее состояние, происходящие технологические и управляющие процессы.

Обобщенная система определяющих уравнений для анализа и управления рисками в сложных системах $R_i(\tau)$ для момента времени τ может быть описана в форме

$$\begin{cases} R_i(\tau) = F\{P_i(\tau), U_i(\tau)\}; \\ P_i(\tau) = F_{P_i}\{P_N(\tau), P_T(\tau), P_S(\tau)\}; \\ U_i(\tau) = F_{U_i}\{U_N(\tau), U_T(\tau), U_S(\tau)\}; \\ R_i(\tau) = F_{R_i}\{R_N(\tau), R_T(\tau), R_S(\tau)\}, \end{cases} \quad (3)$$

где $P_i(\tau), U_i(\tau)$ – интегральные (суммарные) вероятности и ущербы для момента времени τ ;

$P_N(\tau), P_T(\tau), P_S(\tau)$ – вероятности возникновения в момент времени τ чрезвычайных ситуаций, обусловленных человеческим фактором, техническими устройствами и внешней средой соответственно;

$U_N(\tau), U_T(\tau), U_S(\tau)$ – ущербы, наносимые чрезвычайными ситуациями в момент времени τ человеку, объекту (устройству) и внешней среде соответственно.

Вышеуказанная система представляет собой обобщенную модель риска для любой биосоциотехнической системы [5].

Оценка негативных последствий возможных чрезвычайных ситуаций, определение зон действия поражающих факторов не вызывают затруднений. Например, существующие многочисленные расчетные методики позволяют достаточно точно определить зоны возможного поражения вследствие чрезвычайных ситуаций при известных, участвующих в ней, наименованиях опасных веществ, их свойствах и массе. Таким образом, результаты расчета негативных последствий чрезвычайных ситуаций достаточно точны, что позволяет получить объективную информацию о зонах поражения в случае чрезвычайных ситуаций с учетом индивидуальной специфики опасного производственного объекта. Однако определение вероятности возникновения самой чрезвычайной ситуации, численное значение которой непосредственно используют при определении количественных показателей риска, достаточно трудоемко и вызывает определенные сложности.

Существующие методики оценки вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций и ущерба от возможных негативных последствий опираются на сложные математические методы расчета. Также основным источником информации, на основании которого осуществляется аналитическое и математическое определение вероятности возникновения и последствий чрезвычайных ситуаций, – статистические данные о них, которые зачастую недостаточно объективны и достоверны.

На практике вероятность возникновения чрезвычайных ситуаций принимают как среднестатистическую (фоновую) по отрасли для данного вида опасного производственного объекта, что не всегда отражает его индивидуальную специфику. Такой подход не позволяет осуществить объективную оценку риска и предложить эффективные меры безопасности.

Другая важная проблема – отсутствие показателей допустимого риска возникновения чрезвычайных ситуаций для опасных производственных объектов по отраслям промышленности Донецкой Народной Республики. То есть получившиеся в процессе оценки риска показатели подлежат сравнению с неопределенными значениями, не закрепленными ни в одном нормативном правовом документе в области охраны труда и промышленной безопасности. На сегодняшний день в качестве допустимого риска чрезвычайной ситуации используют единственно существующие значения пожарного риска, приведенные в Методике определения расчетных величин пожарных рисков на производственных объектах. Однако для большинства опасных производственных объектов использование только вышеуказанных величин приемлемого риска таких значений недостаточно. Это обусловлено спецификой технологического процесса на опасном производственном объекте и типом воздействия поражающего фактора в результате чрезвычайных ситуаций (например, для химически опасных предприятий, где возможно токсическое поражение вследствие выброса химически опасного вещества; на угольных шахтах, где возможно проявление внезапных газодинамических явлений и т.д.).

Выводы. На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что при анализе опасностей и оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, с использованием рекомендуемых к применению методик, комплексный подход практически не применяют в связи с отсутствием:

- необходимых и достоверных статистических данных о происшедших чрезвычайных ситуациях на опасных производственных объектах в доступных источниках информации;
- законодательно закрепленных показателей допустимого (приемлемого) риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах различных отраслей промышленности Донецкой Народной Республики;
- квалифицированных специалистов по оценке риска и профильных учреждений по их подготовке.

Таким образом, на основании проведенных исследований для решения указанных проблем рекомендуют следующие мероприятия:

- создание централизованной доступной базы данных со статистическими сведениями о происшедших чрезвычайных ситуациях на объектах, включающей подробное описание причин чрезвычайных ситуаций, а также возможность осуществления детальной выборки по заданным параметрам. Подобная база данных, в случае ее создания в доступном электронном виде с возможностью обновления приведенной информации,

имела бы наибольшую эффективность и практическую ценность. Оптимальное решение этого вопроса – создание подобного ресурса на основе информационной базы Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики;

- определение и установление на законодательном уровне показателей допустимого (приемлемого) риска чрезвычайных ситуаций для опасных производственных объектов основных отраслей промышленности Донецкой Народной Республики;

- организация обучения сотрудников заинтересованных предприятий в специализированных организациях по вопросам анализа опасностей и оценки риска.

Список литературы / References

1. Козлитин, А.М. Теоретические основы и практика анализа техногенных рисков. Вероятностные методы количественной оценки опасностей техносферы / А.М. Козлитин, А.И. Попов, П.А. Козлитин. – Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2002. – 178 с.

Kozlitin, A.M., Popov, A.I., Kozlitin, P.A. *Teoreticheskiye osnovy i praktika analiza tekhnogennykh riskov. Veroyatnostnyye metody kolichestvennoy otsenki opasnostey tekhnosfery* [Theoretical basics and practice of analysis of man-made risks. Probabilistic methods of quantitative assessment of technosphere hazards]. Saratov, Sarat. gos. tekhn. un-t Press, 2002, 178 p.

2. Тимофеева, С.С. Оценка техногенных рисков / С.С. Тимофеева. – Москва: Форум; ИНФРА-М, 2017. – 208 с.

Timofeyeva, S.S. *Otsenka tekhnogennykh riskov* [Assessment of man-made risks]. Moscow, Forum; INFRA-M Publ., 2017, 208 p.

3. Галеев, А.Д. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах / А.Д. Галеев. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. – 152 с.

Galeyev, A.D. *Analiz riska avariyy na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh* [Accident risk assessment at hazardous industrial objects]. Kazan, Izd-vo KNITU Press, 2017, 152 p.

4. Гурнович, Т.Г. Оценка и анализ рисков / Т.Г. Гурнович. – Москва: КНОРУС, 2019. – 252 с.

Gurnovich, T.G. *Otsenka i analiz riskov* [Risk assessment and analysis]. Moscow, KNORUS Publ., 2019, 252 p.

5. Мамаев, В.В. Оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах / В.В. Мамаев, А.Ф. Иваненко, П.Е. Мухин // Вестник Академии гражданской защиты. – 2019. – № 3. – С. 124 – 127.

Matyev, V.V., Ivanenko, A.F., Mukhin, P.Ye. *Otsenka riska vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh* [Risk assessment of emergency situations occurrence at the hazardous industrial objects].

Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity: nauch. zhurn. [Civil Defence Academy Journal of EMERCOM of DPR: scientific journal]. Donetsk, 2019, no. 3(19), pp. 124 – 127.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 17.01.2020

Anatoly Fyodorovich Ivanenko, head of department; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;
Pyotr Yevgenyevich Mukhin, Cand. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: petr63203@gmail.com
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-44; 332-78-49

COMPREHENSIVE APPROACH TO THE SAFE OPERATION OF HAZARDOUS INDUSTRIAL OBJECTS

Purpose. Substantiation and choosing of the effective approaches to the risk assessment of occurrence of emergency situations at the hazardous industrial objects for ensuring the safe operation of their facilities.

Methodology. Information and analytical investigations of the risk assessment methods.

Results. The methods of risk assessment of the occurrence of emergency situations at the hazardous industrial objects have been investigated and analyzed, the problems of their application on practice have been identified and the solutions to these problems have been proposed.

Scientific novelty. The requirements to ensuring the safe operation of the hazardous industrial object at all the stages of its operational life have been substantiated.

Practical value. The proposed approach to creation of the centralized data base, determination of the acceptable risk indices, organization of training of risk analysis and risk assessment specialists enable to improve the effectiveness of the analysis of hazards and the risk assessment of emergency situations occurrence at the hazardous industrial objects in order to prevent threats to life and health of the personnel in advance, destructions of technical devices, buildings and constructions as well as the environmental damage.

Keywords: *risk assessment methodology; emergency situation; hazardous industrial object; risk assessment; risk analysis; statistical data; acceptable risk.*

Требования к оформлению статьи

К рассмотрению принимаются статьи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи статьи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступлением 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура статьи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и электронная почта, название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;

- реферат (от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель; методика; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (5–15 слов) на русском и английском языках, реферат не должен повторять названия статьи;

- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации;
- раздел журнала для размещения статьи.

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи;
- описание методики (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Объем статьи, включая текст, таблицы, рисунки, должен быть от 7 до 9 страниц. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Рисунки (диаграммы, фото и др.) располагаются вместе с текстом в местах ссылок на них. Подписи к рисункам должны содержать нумерацию в порядке размещения в тексте и объяснительную подпись. Недопустимо включать подписи в сам рисунок.

Формулы в статьях должны быть набраны с помощью редактора формул (внутренний редактор формул в редакторе Microsoft Word for Windows или Microsoft Equation), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом. Нумерация формул, на которые есть ссылка в тексте, – справа в скобках. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы – в книжной ориентации, они должны иметь тематические заглавия и номера, фон таблицы другим цветом не выделяют. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не более 15 источников с датой их издания не ранее чем за 10 лет и количеством самоссылок до 20 %) приводится в порядке упоминания в тексте.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Ответственность за содержание статьи несет автор. Предоставленные материалы не возвращаются.

Статьи, которые не отвечают требованиям редакции, не рассматриваются.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал

2020, № 2(57)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик Л.А. Ахундова

Верстальщик Н.Н. Грибенюк

Учредитель и издатель

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

Поступившие на издание статьи проходят рецензирование

Подписано к использованию 02.06.2020.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+ 38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 5,5 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 10 июня 2020 г.