



Государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор»
Министерства по делам гражданской обороны,
чрезвычайным ситуациям и ликвидации
последствий стихийных бедствий
Донецкой Народной Республики»

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИ «РЕСПИРАТОР»

№ 2(60)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2023

Научный вестник НИИ «Респиратор». – Донецк, 2023. – № 2(60). – 122 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 предназначены для ученых и специалистов, занимающихся вопросами предупреждения чрезвычайных ситуаций, борьбы с их последствиями, преподавателей, аспирантов и студентов вузов, работников различных отраслей промышленности.

Учредитель и издатель – Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт «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	В.В. Мамаев – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	С.П. Греков
д-р техн. наук	С.Е. Гулько
д-р техн. наук	А.Ф. Долженков
д-р техн. наук	С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь)
д-р техн. наук	В.А. Канин
д-р техн. наук	А.П. Ковалев
д-р техн. наук	К.Н. Лабинский
д-р техн. наук	Д.Ю. Палеев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	Г.П. Стариков
д-р мед. наук	В.В. Черкесов
д-р хим. наук	В.В. Шаповалов

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

Подписан к печати по рекомендации Ученого совета ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» (протокол № 4 от 25.05.2023).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

Свидетельство о регистрации печатной версии журнала ААА № 000263 от 09.08.2022.



State Budgetary Establishment
“The Scientific Research Institute “Respirator”
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic
for Civil Defence, Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters”

**SCIENTIFIC
BULLETIN
OF THE NII “RESPIRATOR”**

No. 2(60)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2023

Scientific bulletin of the NII "Respirator". – Donetsk, 2023. – No. 2(60). – 122 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 – State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator" 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.)	V.V. Mamayev – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Grekov
Dr. Sci. (Tech.)	S.Ye. Gulko
Dr. Sci. (Tech.)	A.F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A.P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	D.Yu. Paleyev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
Dr. Sci. (Med.)	V.V. Cherkesov
Dr. Sci. (Chem.)	V.V. Shapovalov

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

Approved for printing according to the reference of the Academic council of GBU NII "Respirator" EMERCOM DPR (proceeding no. 4 from 25.05.2023).

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

Registration certificate of the printing version of the journal AAA no. 000263 from 09.08.2022.

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

**Агеев В. Г., Пейтибай Г. И.,
Галухин Н. А.**
Методы нечеткой математики
для обоснования номенклатуры
средств забора воды 7

**Мамаев В. В., Симонов А. М.,
Агарков Ал. В.**
Прогнозирование и ликвидация
слоевых скоплений метана
в угольных шахтах 20

Греков С. П., Головченко Е. А.
Динамика адсорбции кислорода углем
в зонах геологических нарушений
и температура его самонагревания 33

Коляда А. Ю., Дикенштейн И. Ф.
Влияние направленности
движения капель в водяной завесе
на эффективность локализации
подземных пожаров 41

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

**Агеев В. Г., Греков С. П.,
Головченко Е. А.**
Определение температуры
самовозгорания угольных скоплений
в шахтах 50

**Козлитин А. А., Лебедева В. В.,
ЩербакOVA О. Н.**
Методика обнаружения
и идентификации нефтепродуктов 58

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

**Ageyev V. G., Peftibay G. I.,
Galukhin N. A.**
Fuzzy mathematics methods in validation
of nomenclature of water drafting tools 7

**Mamayev V. V., Simonov A. M.,
Agarkov Al. V.**
Forecasting and elimination of methane
layer accumulations in coal mines 20

Grekov S. P., Golovchenko Ye. A.
Dynamics of oxygen adsorption by coal
in geological disturbance zones and coal
spontaneous heating temperature 33

Kolyada A. Yu., Dikenshteyn I. F.
Effect of water screen droplets motion
direction on effectiveness of underground
fires containment 41

II. Safety in emergencies

**Ageyev V. G., Grekov S. P.,
Golovchenko Ye. A.**
Determination of spontaneous combustion
temperature of coal accumulations
in mines 50

**Kozlitin A. A., Lebedeva V. V.,
Shcherbakova O. N.**
Technique of detection and identification
of oil products 58

Мороз О. К., Мороз Т. О.

Исследование механизма разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими составами как средства повышения безопасности подземных горных работ

66

Moroz O. K., Moroz T. O.

Investigation of mechanism of rocks destruction by non-explosive demolition compositions as a method of improvement of the safety of underground mining works

**Медгаус В. М., Плетенецкий Р. С.,
Зборщик Л. А., Францев В. И.**

Исследование параметров шахтного самоспасателя ШСС-1П

76

**Medgaus V. M., Pletenetskiy R. S.,
Zborshchik L. A., Frantsev V. I.**

Investigation of the ШСС-1П mine self-rescuer parameters

III. Охрана труда и экологическая безопасность

III. Labor protection and environmental safety

**Бершадский И. А., Савинов Н. А.,
Гладков А. Ю., Ковалев А. П.**

Обоснование параметров температурной защиты клеммного соединения сетевого фильтра

87

**Bershadskiy I. A., Savinov N. A.,
Gladkov A. Yu., Kovalyov A. P.**

Validation of temperature protection parameters of mains power filter connection terminal

Кириян А. П., Серёгин А. Б.

Теплообменные и гидравлические процессы в противотепловой одежде с системой охлаждения рук и ног спасателя

95

Kiryani A. P., Seryogin A. B.

Heat transfer and hydraulic processes in heat protective wear with cooling system for rescuer's arms and legs

Долженков А. Ф., Мороз Т. О.

Анализ расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы

103

Dolzhenkov A. F., Moroz T. O.

Analysis of calculation of noxious substances dispersion in the atmospheric boundary level

Гуржий В. В., Березин А. А.

Влияние сверхтока на возникновение больших переходных сопротивлений в контактных соединениях электроустановок

110

Gurzhiy V. V., Berezin A. A.

Influence of overcurrent on occurrence of high transient resistances in contact joints of electrical installations

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [622.867.2:614.843.3]:510.644.4

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

Георгий Иванович Пефтибай, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;

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

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-36

МЕТОДЫ НЕЧЕТКОЙ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ НОМЕНКЛАТУРЫ СРЕДСТВ ЗАБОРА ВОДЫ

Цель. Методами нечеткой математики подтвердить обоснованность выбора номенклатуры средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода для повышения эффективности горноспасательных работ.

Методы. Информационные исследования и расчетно-аналитические методы нечеткой математики.

Результаты. Получены агрегированные выражения на основе аддитивной свертки нечетких взвешенных критериев для оценки значимости при выборе номенклатуры средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода.

Научная новизна. Предложен системный подход, учитывающий количественные, качественные и трудноизмеримые параметры и использующий методы нечеткой математики, для обоснования выбора номенклатуры средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода. Впервые проведены численные расчеты методами нечеткой математики для определения степени обоснованности выбора средств забора воды.

Практическая значимость. Предложенный инструментарий на базе системного подхода и методов нечеткой математики повышает степень обоснованности выбора номенклатуры средств забора воды, что делает горноспасательные работы более эффективными.

Ключевые слова: номенклатура; средства забора воды; критерии; нечеткая математика; весовые коэффициенты; аддитивная свертка.

Постановка проблемы. Проблема обоснования выбора номенклатуры технических средств относится к многокритериальным задачам принятия решений [1]. Стандартный этап решения такой задачи – формирование репрезентативного перечня критериев (технических параметров), которым должны удовлетворять сравниваемые технические средства (альтернативы). То есть каждой альтернативе соответствует многомерный вектор (упорядоченный набор критериев), компоненты которого имеют числовые значения, взятые, например, из технической документации. Обычно число компонент вектора ограничивают по правилу «основные технические характеристики». Однако наиболее серьезный недостаток традиционных методов решения многокритериальных задач состоит в том, что не учитываются нечисловые критерии качественного характера. Применительно к средствам забора воды

из пожарно-оросительного трубопровода к таким критериям можно отнести следующие: область применения, техника безопасности, независимость от внешних факторов. Например, гидрант-пистолет ГП-3 имеет ограниченную область применения на корродированных участках трубопровода и вблизи фланцевых соединений из-за опасности разгерметизации под действием гидроудара. Остальные средства забора воды не имеют таких ограничений. Кроме того, эксплуатация ГП-3 небезопасна во взрывоопасной среде и требует проведения специальных мероприятий по нормализации газового режима. Все средства забора воды в различной степени зависят от внешних факторов. Так, применение ГП-3 зависит от наличия порохового заряда и разрешительных документов на работу с огнестрельным оружием, а РГ-2-1 и ОСА – от обеспечения режущим инструментом. Надежность – еще один критерий, который часто рассматривают как качественный. Как комплексный показатель она характеризуется рядом числовых подкритериев (всего около 20): вероятностью безотказной работы в течение заданного промежутка времени, наработкой на отказ и др. Однако в технической документации по разным причинам подобные показатели в большинстве случаев не приводят, а получить их в процессе опытной эксплуатации – процесс длительный и трудоемкий. Поэтому критерий «надежность» часто оценивают лингвистическими терминами: «очень низкая», «низкая», «средняя», «высокая», «очень высокая». В этом смысле критерий «надежность» в большей степени соответствует качественным критериям. Несомненно, каждый из вышеперечисленных критериев наряду с числовыми вносит вклад в обобщенный критерий, влияющий на оценку каждой альтернативы.

Поэтому учет совместного влияния количественных и качественных критериев позволяет повысить достоверность выбора номенклатуры средств забора воды, что влечет повышение эффективности ведения горноспасательных работ.

Анализ последних исследований. В работе [2] рассмотрена методика определения численного состава специальных формирований МЧС России с учетом задач, выполняемых в военное время. Авторы свели задачу распределения мобилизационных ресурсов к многокритериальной задаче теории принятия решений с количественными частными критериями на основе интегрального критерия – аддитивной свертки нормализованных частных критериев с учетом их коэффициентов значимости. Учет качественных частных критериев не предусмотрен.

В статье [3] предложена нечеткая многокритериальная модель поддержки принятия решения и метод скалярной оптимизации в задачах управления персоналом. Каждая альтернатива характеризуется обязательными и желательными показателями, которым находят соответствующие мультипликативную и аддитивную свертки соответствующих функций принадлежности. Численных расчетов в статье не приведено.

В статье [4] рассмотрен нечетко-множественный подход при принятии управленческих решений. Предложены критерии обоснования управленческих решений с использованием методов нечеткой математики при наличии факторов риска.

В работе [5] проведено ранжирование средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода методом анализа иерархий с использованием числовых критериев. Нечисловые (качественные) критерии в решении многокритериальной задачи не учитывались, что снижает уровень обоснованности выбора номенклатуры средств забора воды.

Цель работы – методами нечеткой математики подтвердить обоснованность выбора номенклатуры средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода для повышения эффективности горноспасательных работ.

Результаты исследований. Для подтверждения обоснованности выбора номенклатуры средств забора воды и оценки их значимости предлагается использовать не только числовые критерии (числовые технические параметры), но и плохо формализуемые – качественные, а также трудноизмеримые, например надежность. В эту группу критериев, условно названных качественными, входят: безопасность эксплуатации, область применения, независимость от внешних факторов, надежность. Группа числовых критериев взята из ранее опубликованной нами работы [5].

Словесное выражение качественного критерия называется лингвистической переменной [6]. Например, лингвистическая переменная «Безопасность эксплуатации» имеет пять значений (термов):

- нечеткое подмножество состояний «очень низкий уровень безопасности»;
- нечеткое подмножество состояний «низкий уровень безопасности»;
- нечеткое подмножество состояний «средний уровень безопасности»;
- нечеткое подмножество состояний «высокий уровень безопасности»;
- нечеткое подмножество состояний «очень высокий уровень безопасности».

Лингвистическая переменная «Область применения» имеет следующие пять значений:

- нечеткое подмножество состояний «очень узкая область применения»;
- нечеткое подмножество состояний «узкая область применения»;
- нечеткое подмножество состояний «область применения средняя»;
- нечеткое подмножество состояний «широкая область применения»;
- нечеткое подмножество состояний «очень широкая область применения».

Лингвистическая переменная «Независимость от внешних факторов» имеет пять значений:

- нечеткое подмножество состояний «очень низкая независимость»;
- нечеткое подмножество состояний «низкая независимость»;
- нечеткое подмножество состояний «средняя независимость»;
- нечеткое подмножество состояний «высокая независимость»;
- нечеткое подмножество состояний «очень высокая независимость».

Каждая трапеция соответствует последовательности лингвистических термов и их числовых оценок (см. табл. 1), а количество трапеций равно количеству лингвистических термов. Все трапеции зацеплены (пересекаются), а область пересечения – область нечеткости (неполной уверенности в правильности классификации).

Например, значению носителя подмножества b_0 соответствуют два лингвистических термина «очень низкий» и «низкий», которые имеют одинаковую степень принадлежности μ , равную 0,5. Таким образом, нечеткое трапециевидное число устанавливает степень принадлежности из отрезка $[0,1]$ каждому нечеткому подмножеству значений лингвистической переменной.

Группу числовых критериев фазифицируем (от английского «fuzzy» – нечеткий, размытый, расплывчатый) с помощью шкалы оценок треугольных нечетких чисел (табл. 2).

Таблица 2

Шкала оценок числовых критериев

Лингвистический терм	Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
Оценка	(0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,9)	(0,7; 0,9; 1)

Графическое изображение треугольных нечетких чисел представлено на рисунке 2.

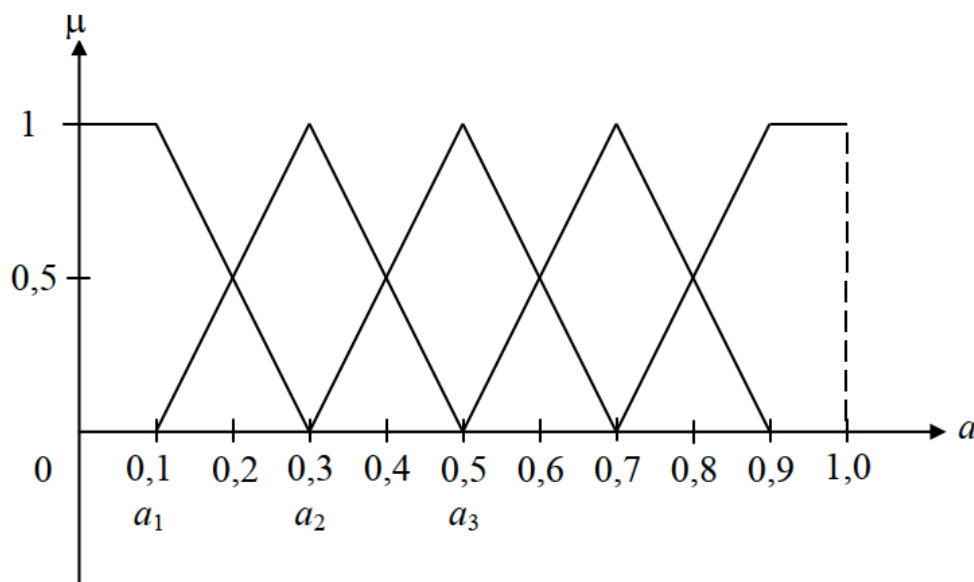


Рис. 2. Треугольные нечеткие числа

Для удобства работы с различными нечеткими числами переведем шкалу треугольных оценок числовых критериев в трапециевидную, добавляя

фиктивную координату верхнего основания трапеции, равную абсциссе – средней вершине треугольного нечеткого числа. В результате получим шкалу трапециевидных нечетких оценок числовых критериев (табл. 3).

Таблица 3

Шкала трапециевидных нечетких оценок числовых критериев

Лингвистический терм	Очень низкий	Низкий	Средний	Высокий	Очень высокий
Оценка	(0; 0; 0,1; 0,3)	(0,1; 0,3; 0,3; 0,5)	(0,3; 0,5; 0,5; 0,7)	(0,5; 0,7; 0,7; 0,9)	(0,7; 0,9; 1; 1)

Используя шкалы оценок качественных и числовых критериев, поставим в соответствие каждой альтернативе трапециевидную нечеткую оценку по каждому критерию. Для этого воспользуемся первичными числовыми данными средств забора воды из работы [5] (табл. 4).

Таблица 4

Первичные числовые данные средств забора воды

Альтернатива		Критерий			
		a_1	a_2	a_3	a_4
		Диаметр отверстия, мм	Максимальный диаметр трубопровода, мм	Максимальное давление, МПа	Масса, кг
ГП-3	K_1	25	250	2,0	16,0
РГ-2-1	K_2	28	300	6,4	20,3
ОСА	K_3	30	250	2,0	9,0

Фазифицированные значения из таблицы 4 представлены матрицей (1).

Альтернатива	Критерий			
	a_1	a_2	a_3	a_4
K_1	(0,1; 0,3; 0,3; 0,5)	(0,5; 0,7; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,7; 0,9)	(0,1; 0,3; 0,3; 0,5)
K_2	(0,3; 0,5; 0,5; 0,7)	(0,7; 0,9; 1; 1)	(0,7; 0,9; 1; 1)	(0; 0; 0,1; 0,3)
K_3	(0,5; 0,7; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,7; 0,9)	(0,5; 0,7; 0,7; 0,9)

(1)

Используя таблицу 1 для шкалы оценок, получаем матрицу (2) трапециевидных нечетких чисел качественных критериев.

(2)

Альтернатива	Критерий			
	b_1	b_2	b_3	b_4
	Безопасность	Область применения	Независимость от внешних факторов	Надежность
K_1	(0,15; 0,25; 0,35; 0,45)	(0,55; 0,65; 0,75; 0,85)	(0,55; 0,65; 0,75; 0,85)	(0,15; 0,25; 0,35; 0,45)
K_2	(0,35; 0,45; 0,55; 0,65)	(0,75; 0,85; 1; 1)	(0,75; 0,85; 1; 1)	(0; 0; 0,15; 0,25)
K_3	(0,55; 0,65; 0,75; 0,85)	(0,55; 0,65; 0,75; 0,85)	(0,55; 0,65; 0,75; 0,85)	(0,55; 0,65; 0,75; 0,85)

(2)

Примем иерархическую схему принятия решения о предпочтительности альтернатив в следующем виде (рис. 3).

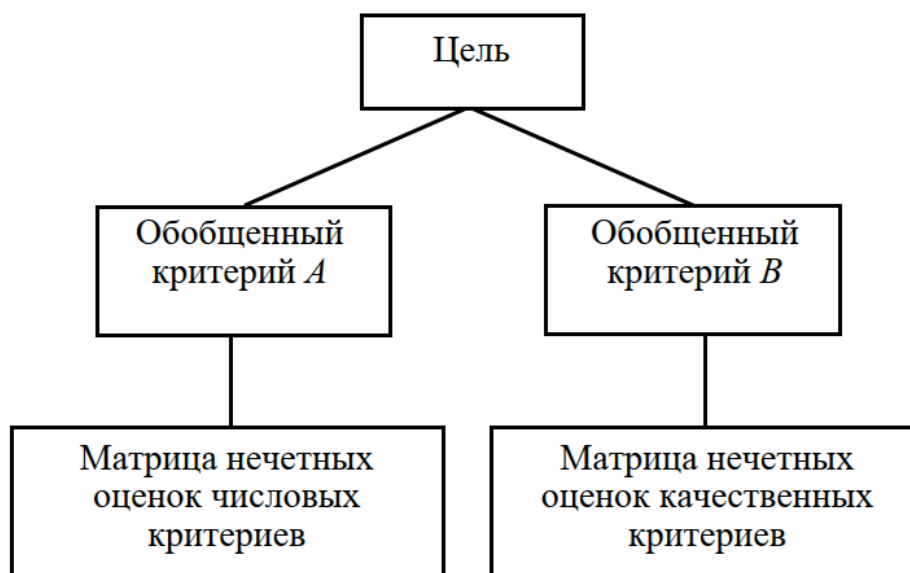


Рис. 3. Иерархическая схема принятия решения

Согласно иерархической схеме принятия решения каждый нижерасположенный уровень критериев определяет значение критерия более высокого уровня. Так, нижерасположенные матрицы оценок числовых и качественных критериев путем агрегирования показателей определяют значения вышерасположенных обобщенных критериев A и B , которые, в свою очередь, агрегируются для достижения цели – получения оценки степени предпочтительности каждой альтернативы. Поскольку матрицы оценок числовых и качественных критериев состоят из трапециевидных нечетких чисел, то и результирующий ряд оценок степени предпочтительности альтернативы также будет состоять из трапециевидных нечетких чисел. Поскольку трапециевидные нечеткие числа – самостоятельные математические объекты, то операции с ними возможны в рамках правил нечеткой математики.

Суммирование, вычитание и умножение осуществляются покомпонентно аналогично операциям в обычной математике. Специфическими являются операции: дефазификация (преобразование в четкое число), деление, нахождение обратного нечеткого числа.

При принятии решения о выборе предпочтительной альтернативы примем следующие допущения:

- числовые критерии имеют разные весовые коэффициенты;
- качественные критерии имеют разные весовые коэффициенты;
- обобщенные критерии A и B имеют разные весовые коэффициенты.

Для получения весовых коэффициентов всех вышеперечисленных случаев применим модифицированный нечеткий аналитический метод сравнения Саати.

Для этого воспользуемся шкалой нечетких треугольных чисел парных сравнений (табл. 5).

Таблица 5

Шкала нечетких треугольных чисел парных сравнений

Описание	Нечеткая шкала		Четкая шкала Саати
	C_{ij}	C_{ji}	
Отсутствие преимущества	(1; 1; 1)	(1; 1; 1)	1
Слабое преимущество	(1; 3/2; 2)	(1/2; 2/3; 1)	3
Существенное преимущество	(3/2; 2; 5/2)	(2/5; 1/2; 2/3)	5
Явное преимущество	(2; 5/2; 3)	(1/3; 2/5; 1/2)	7
Абсолютное преимущество	(5/2; 3; 7/2)	(2/7; 1/3; 2/5)	9

На основании данных таблиц 4 и 5 составим матрицу нечетких попарных сравнений числовых критериев, представленных в матрице (3).

Кри-терий	a_1	a_2	a_3	a_4	Среднее значение	Нечеткий весовой коэффициент
a_1	(1; 1; 1)	(1; 3/2; 2)	(2; 5/2; 3)	(1; 1; 1)	(1,25; 1,5; 1,75)	(0,23; 0,32; 0,44)
a_2	(1/2; 2/3; 1)	(1; 1; 1)	(1; 3/2; 2)	(1/3; 2/5; 1/2)	(0,70; 0,89; 1,13)	(0,13; 0,19; 0,19; 0,23)
a_3	(1/3; 2/5; 1/2)	(1/2; 2/3; 1)	(1; 1; 1)	(1/3; 2/5; 1/2)	(0,54; 0,62; 0,75)	(0,10; 0,13; 0,19)
a_4	(1; 1; 1)	(2; 5/2; 3)	(2; 5/2; 3)	(1; 1; 1)	(1,50; 1,75; 2,00)	(0,27; 0,37; 0,50)

Проведем суммирование столбца «Среднее значение» матрицы (3) и разделим на эту сумму (3,99; 4,76; 5,63) каждый элемент столбца «Среднее

значение». Получившиеся нечеткие коэффициенты указаны в последнем столбце матрицы (3).

Матрицу нечетких попарных сравнений качественных критериев и обобщенных критериев A, B получим аналогичным путем. Результаты сравнения приведены в матрицах (4) и (5).

Кри-терий	b_1	b_2	b_3	b_4	Среднее значение	Нечеткий весовой коэффициент
b_1	(1; 1; 1)	(2; 5/2; 3)	(2; 5/2; 3)	(2; 5/2; 3)	(1,75; 2,13; 2,50)	(0,31; 0,47; 0,23)
b_2	(1/3; 2/5; 1/2)	(1; 1; 1)	(1; 3/2; 2)	(1; 1; 1)	(0,83; 0,98; 1,13)	(0,15; 0,22; 0,28)
b_3	(1/3; 2/5; 1/2)	(1/2; 2/3; 1)	(1; 1; 1)	(1/2; 2/3; 1)	(0,58; 0,68; 0,88)	(0,10; 0,15; 0,28)
b_4	(1/3; 2/5; 1/2)	(1; 1; 1)	(1; 3/2; 2)	(1; 1; 1)	(0,83; 0,98; 1,13)	(0,15; 0,22; 0,28)

(4)

Обобщенный критерий	A	B	Среднее значение	Нечеткие весовые коэффициенты
A	(1; 1; 1)	(1; 3/2; 2)	(1; 1,25; 1,50)	(0,4; 0,60; 0,86)
B	(1/2; 2/3; 1)	(1; 1; 1)	(0,75; 0,84; 1)	(0,30; 0,40; 0,57)

(5)

Ранжирование (установление степени предпочтения) каждой из альтернатив K_1, K_2, K_3 выполним с помощью агрегирования на основе аддитивной свертки нечетких взвешенных критериев нижерасположенных уровней. Общее решение может быть представлено в виде

$$R_{K_l} = \omega_A P_{K_l} + \omega_B F_{K_l},$$

где R_{K_l} – нечеткая оценка степени предпочтения альтернативы K_l ;

l – количество альтернатив;

ω_A, ω_B – трапециевидные нечеткие весовые коэффициенты обобщенных критериев A, B :

$$\omega_A = (\omega_{A1}, \omega_{A2}, \omega_{A3}, \omega_{A4}), \omega_B = (\omega_{B1}, \omega_{B2}, \omega_{B3}, \omega_{B4});$$

P_{K_l} – нечеткая составляющая оценки степени предпочтения альтернативы K_l , обусловленная числовыми критериями;

F_{K_l} – нечеткая составляющая оценки степени предпочтения альтернативы K_l , обусловленная качественными критериями.

P_{K_l} и F_{K_l} найдем в виде аддитивных взвешенных нечетких сверток

$$P_{K_l} \omega_A = \left(\omega_{A1} \sum_{i=1}^n \alpha_{i1} a_{i1}(K_l), \omega_{A2} \sum_{i=1}^n \alpha_{i2} a_{i2}(K_l), \omega_{A3} \sum_{i=1}^n \alpha_{i3} a_{i3}(K_l), \omega_{A4} \sum_{i=1}^n \alpha_{i4} a_{i4}(K_l) \right);$$

$$F_{K_l} \omega_B = \left(\omega_{B1} \sum_{j=1}^m \beta_{j1} b_{j1}(K_l), \omega_{B2} \sum_{j=1}^m \beta_{j2} b_{j2}(K_l), \omega_{B3} \sum_{j=1}^m \beta_{j3} b_{j3}(K_l), \omega_{B4} \sum_{j=1}^m \beta_{j4} b_{j4}(K_l) \right);$$

$$R_{K_l} = \left(\omega_{A1} \sum_{i=1}^n \alpha_{i1} a_{i1}(K_l) + \omega_{B1} \sum_{j=1}^m \beta_{j1} b_{j1}(K_l), \omega_{A2} \sum_{i=1}^n \alpha_{i2} a_{i2}(K_l) + \omega_{B2} \sum_{j=1}^m \beta_{j2} b_{j2}(K_l), \right.$$

$$\left. \omega_{A3} \sum_{i=1}^n \alpha_{i3} a_{i3}(K_l) + \omega_{B3} \sum_{j=1}^m \beta_{j3} b_{j3}(K_l), \omega_{A4} \sum_{i=1}^n \alpha_{i4} a_{i4}(K_l) + \omega_{B4} \sum_{j=1}^m \beta_{j4} b_{j4}(K_l) \right).$$

Величины R_{K_l} рассчитываем для $l = 1, 2, 3$. Используя выражения для R_{K_l} , получим следующие трапециевидные нечеткие оценки предпочтений для альтернатив: $K_1 - (0,13; 0,42; 0,47; 1,23)$, $K_2 - (0,18; 0,47; 0,57; 1,35)$, $K_3 - (0,15; 0,70; 0,74; 1,76)$.

Для более точного анализа проведем дефазификацию (преобразование в обычные четкие числа) полученных оценок степени предпочтения альтернатив методом Чью – Парка [7]

$$CPR = \frac{d_1 + d_2 + d_3 + d_4}{4} + \omega \frac{d_2 + d_3}{2},$$

где CPR – четкое число;

ω – фиксированное число (для симметричных трапециевидных чисел $\omega = 1$).

Тогда

$$CPR_{K_1} = \frac{0,13 + 0,42 + 0,47 + 1,23}{4} + \frac{0,42 + 0,47}{2} = 1;$$

$$CPR_{K_2} = \frac{0,18 + 0,47 + 0,57 + 1,35}{4} + \frac{0,47 + 0,57}{2} = 1,16;$$

$$CPR_{K_3} = \frac{0,15 + 0,70 + 0,74 + 1,76}{4} + \frac{0,70 + 0,74}{2} = 1,56.$$

Нормализуем полученные четкие числа, приводя их к отрезку $[0, 1]$. В результате получаем следующий ряд предпочтений средств забора воды: ОСА

(0,42), РГ-2-1 (0,31), ГП-3 (0,27). Таким образом, наиболее предпочтительно устройство ОСА, далее идут РГ-2-1 и ГП-3, что совпадает с результатами, полученными в работе [5]. Однако такое совпадение предпочтений не обязательно, поскольку дополнительно учтена трудноформализуемая качественная информация. В частности, более полный анализ количественных и качественных критериев показал незначительное отличие в предпочтениях между средствами забора воды РГ-2-1 и ГП-3.

Выводы. Комплексный учет технических параметров: числовых, нечисловых (качественных), неформализуемых, неточных, неизмеримых (трудноизмеримых) представляет собой системный подход к процессу принятия решения при выборе номенклатуры средств забора воды. Показано, что решение многокритериальной задачи ранжирования средств забора воды с учетом использования НЕ-факторов может быть осуществлено на базе методов нечеткой математики. Численный расчет, выполненный в терминах нечеткой математики, показал совпадение ранжированного ряда средств забора воды с ранее опубликованными [5] результатами. Системный подход и методы нечеткой математики при выборе номенклатуры средств забора воды позволяют подтвердить степень обоснованности принятия решения.

Список литературы / References

1. Саати, Т. Л. Принятие решений. Метод анализа иерархий / Т. Л. Саати; пер. с англ. Р.Г. Вачнадзе. – Москва : Радио и связь, 1993. – 314 с.

Saaty T. L. *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. New York, McGraw-Hill International Book Company, 1980. 281 p. (Russ. ed.: Saati T. L. *Prinyatiye resheniy. Metod analiz iyerarkhiy*. Moscow, Radio i svyaz Publ. 1993, 314 p.

2. Панченков, В. В. Методика определения численности личного состава специальных формирований гражданской обороны с учетом объема задач, выполняемых в военное время / В. В. Панченков, А. И. Мазаник, Е. В. Усолов // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2022. – № 2(53). – С. 3 – 11.

Panchenkov V. V., Mazanik A. I., Usolov Ye. V. *Metodika opredeleniya chislennosti lichnogo sostava spetsialnykh formirovaniy grazhdanskoy oborony s uchyotom obyoma zadach, vpolnyayemykh v voennoe vremya* [Technique to determine the number of civil defence special units manpower factoring in the amount of wartime assignments]. *Nauchnye i obrazovatelnyye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2022, no. 2(53), pp. 3-11. (In Russian)

3. Мамедова, М. Г. Нечеткая многокритериальная модель поддержки принятия решений в задачах управления персоналом / М. Г. Мамедова, З. Г. Джабраилова // Informasiya texnologiyalari problemləri. – 2012. – № 2(6). – С. 37 – 46.

Mamedova M. G., Dzhabrailova Z. G. *Nechyotkaya mnogokriterialnaya model podderzhki prinyatiya resheniy v zadachakh upravleniya personalom* [Fuzzy multicriterial model of decision making support in human resource management problems]. *Informasiya texnologiyalari problemləri*, 2012, no. 2(6), pp. 37-46. (In Russian)

4. Бабушкина, О. В. Нечетко-множественный подход при принятии управленческих решений с учетом факторов риска / О. В. Бабушкина, С. В. Слабинский // Вестник Уральского федерального университета. Серия «Экономика и управление». – 2015. – № 1. – С. 20 – 35.

Babushkina O. V., Slabinskiy S. V. *Nechetko-mnozhestvennyy podkhod pri prinyatii upravlencheskikh resheniy s uchyotom faktorov riska* [Fuzzy-set approach in management decision making factoring in the risk factors]. *Vestnik Uralskogo federalnogo universiteta. Seriya "Ekonomika i upravleniye"*, 2015, no. 1, pp. 20-35. (In Russian)

5. Пефтибай, Г. И. Обоснование выбора номенклатуры средств механизации горноспасательных работ на примере средств забора воды / Г. И. Пефтибай, Н. А. Галухин, А. В. Ивахненко // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2023. – № 1(60). – С. 79 – 89.

Peftibay G. I., Galukhin N. A., Ivakhnenko A. V. *Obosnovaniye vybora nomenklatury sredstv mekhanizatsii gornospasatelnykh работ na primere sredstv zabora vody* [Substantiation for selection a set of mine-rescue engineer equipment exemplified by water drafting tools]. *Nauchnyy vestnik NII "Respirator"*, 2023, no. 1(60), pp. 79-89. (In Russian)

6. Черняев, А. П. Особенности моделирования процессов и явлений технических объектов любой природы с помощью теории нечетких множеств и понятия лингвистической переменной / А. П. Черняев // Научное обозрение. Технические науки. – 2016. – № 3. – С. 113 – 117.

Chernyaev A. P. *Osobennosti modelirovaniya protsessov i yavleniy tekhnicheskikh obyektov lyuboy prirody s pomoshchyu teorii nechyotkikh mnozhestv i ponyatiya lingvisticheskoy peremennoy* [Specifics of modeling the processes and events of technical objects of different nature applying the fuzzy sets theory and linguistic variable notion]. *Nauchnoye obozreniye. Tekhnicheskiye nauki*, 2016, no. 3, pp. 113-117. (In Russian)

7. Применение теории нечетких множеств к задаче формирования портфеля проектов / В. М. Аньшин, И. В. Демкин, И. Н. Царьков, И. М. Никонов // Проблемы анализа риска. – 2008. – Т. 5, № 3. – С. 8 – 21.

Anshin V. M., Demkin I. V., Tsarkov I. N. *Primeneniye teorii nechyotkikh mnozhestv k zadache formirovaniya portfelya projektov* [Fuzzy sets theory application in problem of projects portfolio formation]. *Problemy analiza riskov*, 2008, vol. 5, no. 3, pp. 8-21. (In Russian)

*Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. Tech., director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Georgy Ivanovich Pefitbay, Cand. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;
Nikolay Aleksandrovich Galukhin, senior scientific associate; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”
238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-36*

FUZZY MATHEMATICS METHODS IN VALIDATION OF NOMENCLATURE OF WATER DRAFTING TOOLS

Purpose. Applying the fuzzy mathematics methods to confirm the validity of selected nomenclature of appliance for drafting water from firefighting-sprinkler pipeline in order to improve efficiency of mine-rescue operations.

Methods. Research of information and analytical and computational methods of fuzzy mathematics.

Scientific novelty. The integrated approach to validation of the nomenclature of appliance for drafting water from firefighting-sprinkler pipeline has been proposed; it takes into account the quantitative, qualitative and hard to measure parameters and applies methods of fuzzy mathematics. For the first time ever the fuzzy mathematics methods have been applied to calculate the validity level of the water draft appliance nomenclature selection.

Scientific novelty. The integrated approach to validation of the nomenclature of appliance for drafting water from firefighting-sprinkler pipeline has been proposed; it takes into account the quantitative, qualitative and hard to measure parameters. For the first time ever the fuzzy mathematics methods have been applied to calculate the validity level of the nomenclature of water draft appliance.

Practical value. Being based on the integrated approach and fuzzy mathematics methods the proposed apparatus enhances the validity of selected nomenclature of the water draft set appliance which makes the mine-rescue operations more effective.

Keywords: *nomenclature; water drafting tools; criteria; fuzzy mathematics; weight coefficients; additive resultant.*

УДК [622.411.33:001.891.572]:622.454

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

Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: simonov54_54@mail.ru;

Александр Владиславович Агарков, канд. техн. наук, вед. инж.; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru
Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-34

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ И ЛИКВИДАЦИЯ СЛОЕВЫХ СКОПЛЕНИЙ МЕТАНА В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ

Цель. Разработать метод прогноза и способы ликвидации слоевых скоплений метана в горных выработках угольных шахт для обеспечения безопасности труда шахтеров.

Методы. Использован комплексный метод исследования, включающий анализ литературных источников, проведение теоретических исследований и сравнение результатов с данными, полученными эмпирическим путем в подземных условиях угольных шахт. Выполнено математическое моделирование с использованием фундаментальных законов массопереноса, теории дифференциальных уравнений и численных методов их решения, методов математической статистики для обработки результатов исследований.

Результаты. Разработана математическая модель процесса слоевого загазования метаном горных выработок и предложены эффективные способы ликвидации слоевых скоплений метана в шахтах.

Научная новизна. Установлены зависимости процесса слоевого загазования метаном горных выработок, которые отличаются от известных тем, что учтено совокупное влияние горнотехнических параметров, характеризующих геометрические размеры выработки, условия ее проветривания, дебит и кинематические характеристики метана, наличие источников газовыделения. На основании зависимостей разработан метод прогноза слоевого загазования выработок шахт, определения длины и толщины метановых слоев.

Практическая значимость. Применение различных способов борьбы со слоевыми скоплениями метана в выработках позволит повысить безопасность труда шахтеров при ведении горных работ на сопряжениях очистных забоев с вентиляционными штреками и в них. Предложенный метод прогноза газовой обстановки и способы ликвидации слоевых скоплений могут быть использованы при разработке нормативных и методических документов в угольной промышленности.

Ключевые слова: угольная шахта; горная выработка; аэрогазодинамика; прогноз слоевых скоплений метана; ликвидация метановых слоев; безопасность труда шахтеров.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Повышение эффективности функционирования угольной промышленности – одно из ключевых направлений развития экономики Российской Федерации [1]. Однако при отработке выемочных полей в процессе ведения горных работ опасность для шахтеров представляют слоевые скопления метана вдоль выработок, под которыми подразумевают относительно протяженную (10...210 м) область у кровли с повышенным содержанием метана. Слоевые скопления – частая причина взрывов метановоздушной смеси в шахтах.

Образуются метановые слои в выработках при сосредоточенных (суфлярных) и рассредоточенных по поверхности источниках метана, при малой скорости движения воздуха (менее 1 м/с), когда поступление газа в подкровельное пространство превышает его вынос (интенсивное выделение метана и низкая турбулентность воздушного потока). Чаще встречаются в выработках с большим сечением.

Анализ последних исследований и публикаций. Исследованиям слоевых скоплений метана в угольных шахтах посвящены научные труды ведущих ученых: В. Г. Агеева, А. М. Брюханова, А. И. Боброва, С. П. Грекова, А. М. Ермолаева, А. М. Кириченко, В. Г. Клочкова, Н. М. Кошелева, С. Н. Осипова, А. Л. Суркова, В. Н. Сатарова, А. М. Устинова, К. З. Ушакова и других [2–5]. Авторы обозначили условия формирования скоплений метана в подготовительных и очистных выработках выемочных участков шахт.

Известно, что слоевые скопления встречаются в тупиковых выработках на сопряжениях очистных забоев с вентиляционными штреками и в них. Однако отсутствуют методы прогноза длины и ширины метановых слоев в горных выработках шахт. Это – актуальная научно-техническая задача, решение которой позволит повысить уровень безопасности труда шахтеров при ведении горных работ. Важное практическое значение также имеет определение способов борьбы со слоевыми скоплениями метана.

Профессор К. З. Ушаков в монографии [3] изложил обобщенные результаты многочисленных экспериментальных исследований в области газовой динамики шахт, рассмотрел процессы образования и переноса метановых слоев в выработках. Эта работа – базовая для сравнения результатов теоретических исследований с экспериментальными данными.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований [3–5], посвященных оценке газовой обстановки шахт, приводит к выводу, что предлагаемые разными авторами расчетные методики не в полной мере позволяют прогнозировать слоевое загазование метаном выработок с учетом совокупного влияния горнотехнических факторов, характеризующих условия проветривания и дебит метана, наличия источников газовой выделению.

Результаты исследований. При определении слоевого скопления метана весьма затруднительно осуществлять большое количество измерений по длине и высоте выработки, поэтому параметры слоев можно рассчитать совместным решением уравнений движения воздуха, диффузии газов и неразрывности их потока. Для описания распределения газов в выработках используем уравнение конвективной диффузии метана. Пренебрежем поперечным конвективным переносом по сравнению с продольным переносом, а также диффузией в продольном и поперечном направлениях и получим

$$\frac{\partial C}{\partial \tau} + \frac{\partial(uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + f, \quad (1)$$

где C – концентрация метана, кг/м³;

τ – время с момента начала отсчета, с;

u – скорость воздуха по длине горной выработки, м/с;

x, y – продольная и вертикальная координаты в горной выработке, м;

D_y – коэффициент турбулентной диффузии метана в вертикальном направлении, м²/с;

f – интенсивность источников метановыделения, м³/(с·м³).

При рассмотрении стационарных процессов конвективной диффузии уравнение (1) примет вид

$$\frac{\partial(uC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} \left(D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + f. \quad (2)$$

Как установлено, коэффициент вертикальной диффузии линейно зависит от скорости воздуха и можно принять

$$D_y = D_0 + a_k u,$$

где D_0 – коэффициент диффузии газа, м²/с;

a_k – эмпирическая константа, м.

При коэффициенте диффузии газа $D_0 = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с и скорости воздуха $u > 0,1$ м/с можно принять

$$D_y \approx a_k u. \quad (3)$$

Полагая скорость воздуха функцией только продольной координаты x и подставляя формулу (3) в уравнение (2), получим

$$\frac{\partial(uC)}{\partial x} = a_k \frac{\partial^2(uC)}{\partial y^2} + f. \quad (4)$$

Весовой расход метана G , кг/с, равен

$$G = \rho_M u S C,$$

где ρ_M – плотность метана, кг/м³;

S – площадь поперечного сечения горной выработки, м².

В этом случае уравнение конвективной диффузии (4) примет вид

$$\frac{\partial G}{\partial x} = a_k \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \rho_M S f, \quad (5)$$

где интенсивность источника метановыделения может быть представлена как некоторая функция

$$f = x_M q(x)/S, \quad (6)$$

где x_M – доля метана, который выделяется с боковых стенок горной выработки и равномерно перемешивается с воздухом;

$q(x)$ – дебит метана, как функция от x вдоль горной выработки, м³/с.

Подставив выражение (6) в уравнение (5), получим

$$\frac{\partial G}{\partial x} = a_K \frac{\partial^2 G}{\partial y^2} + \rho_M x_M q(x).$$

В качестве граничных условий на входе в горную выработку примем

$$G(0, y) = G_0,$$

где G_0 – начальный весовой расход метана, кг/с.

Направим ось y сверху вниз от кровли к почве горной выработки и примем на почве условие газонепроницаемости

$$\frac{\partial G(x, h)}{\partial y} = 0,$$

а из кровли выработки в результате плавучести метана направим отличный от нуля поток с интенсивностью

$$\frac{\partial G(x, 0)}{\partial y} = - \frac{(1 - x_M)h}{a_K} \rho_M q(x),$$

где h – высота горной выработки, м.

Для прогноза наиболее опасных суффлярных выделений метана можно использовать упрощенный метод расчета параметров слоя. Обычно суффляром считается выделение газа (метана) из природных и эксплуатационных трещин в горные выработки с дебитом 1 м³/мин и более на участке выработки менее 20 м [5]. Однако данные шахтных экспериментов показывают, что и при дебите метана менее 1 м³/мин, например при дебите 0,3 м³/мин могут образовываться слои протяженностью до 50 м. Многое зависит также от скорости движения воздуха и от площади поперечного сечения выработок. Поэтому нельзя заранее утверждать, при каком дебите метана образуется слой.

Для расчетов параметров метановых слоев воспользуемся данными, приведенными в фундаментальных работах профессора К. З. Ушакова. Число Ричардсона Ri – основной параметр, определяющий местоположение метановых слоев как отношение подъемных сил метана к динамическим силам воздуха

$$Ri = -\frac{g \frac{\partial \rho_m}{\partial y} \cos \beta}{\rho_0 \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2},$$

где g – ускорение свободного падения, равное $9,81 \text{ м/с}^2$;

β – угол наклона горной выработки к горизонту, град.;

ρ_0 – плотность воздуха, кг/м^3 .

Представим в конечных разностях частные производные в числе Ричардсона Ri и для горизонтальной выработки ($\beta = 0$) получим

$$Ri = -\frac{g \Delta \rho \Delta y}{\rho_0 \Delta u^2},$$

где $\Delta \rho$ – разность между плотностью воздуха и плотностью метана, кг/м^3 ;

Δy – ширина горной выработки, м;

Δu – скорость на границе слоевого скопления, м/с.

Примем приращения параметров равными $\Delta \rho = \rho_m - \rho_0$; $\Delta y = h$; $\Delta u = \tilde{u}$, где \tilde{u} – средняя по сечению горной выработки скорость воздуха, м/с. Здесь $h = \sqrt{S}$.

Так как плотность смеси газов определяют по формуле

$$\rho = \rho_0 - (\rho_0 - \rho_m) C_1,$$

то число Ричардсона Ri примет следующий вид:

$$Ri = \frac{g(\rho_0 - \rho_m) C_1 \sqrt{S}}{\rho_0 \tilde{u}^2},$$

где C_1 – средняя концентрация метана.

Будем считать, что длина слоевого скопления l , м, зависит от числа Ричардсона Ri

$$l = f(Ri).$$

Анализ экспериментальных исследований показал, что длину метановых слоев ($l = x_2$) по концентрации 2 % можно представить в виде степенной зависимости

$$\frac{x_2}{\sqrt{S}} = 18,6 Ri^{0,25}.$$

На рисунке 1 представлены результаты сравнения степенной зависимости с экспериментальными данными.

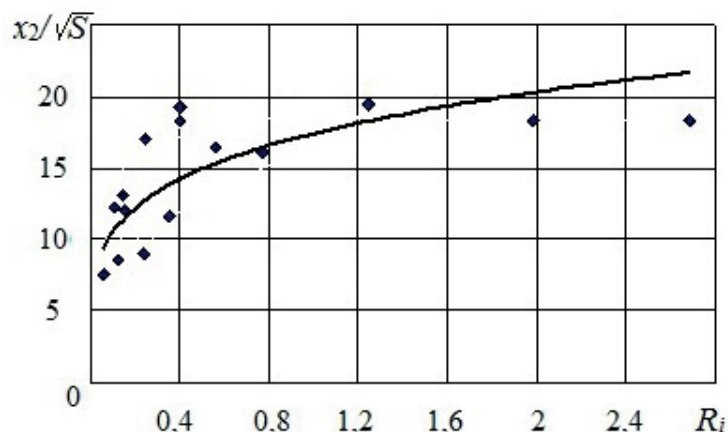


Рис. 1. Зависимость длины метанового слоя от числа Ричардсона по концентрации 2 %

Сравнение расчетных и фактических данных при определении длины метановых слоев позволило установить, что максимальные отклонения значений для 15 шахтных экспериментов не превышают 14 %.

По экспериментальным данным наблюдений за метановыми слоями в вентиляционных (в основном) и откаточных штреках, в квершлагах было установлено, что расстояние от забоя лавы до места образования слоя составляло 20...70 м. Это соответствует максимуму газовыделения из сближенных пластов.

Для определения коэффициента вертикальной диффузии метана или параметра a_k воспользуемся формулой для концентрированных источников газовыделения (суфлярных выделениях метана) и при $y = 0$ найдем

$$C(x, 0) = C_n + \frac{q(x)}{Q(x)} + \frac{q_{сл}}{ub\sqrt{\pi a_k x}}, \quad (7)$$

где C_n – начальная концентрация метана в выработке, моль/м³;

$Q(x)$ – расход воздуха по длине горной выработки, м³/с;

$q_{сл}$ – дебит метана в слоевом скоплении, кг/м³;

b – ширина выработки, м.

По формуле (7) определяют длину метанового слоя, если ее разрешить относительно $x = x_n$

$$x_n = \frac{q_{сл}^2}{\pi a_k u^2 b^2 (C_n - C_m)^2}, \quad (8)$$

где x_n – длина метанового слоя по концентрации C_n , м;

C_n – предельно допустимая концентрация метана в слое;

C_m – средняя концентрация метана за слоевым скоплением, $C_m = C_n + q/Q$.

Сравнивая формулы (7) и (8) по концентрации 2 %, получим

$$18,6\sqrt{S}Ri^{0,25} = \frac{q_{сл}^2}{\pi a_k u^2 b^2 (C - C_M)^2},$$

откуда найдем эмпирическую константу

$$a_k = \frac{q_{сл}^2}{18,6\pi u^2 b^2 \sqrt{S} Ri^{0,25} (C - C_M)^2}. \quad (9)$$

Упростим эту зависимость, принимая $b = \sqrt{S}$ и $C_M \approx q_{сл}/Q$. Поскольку длину слоя метана определяли при $q_{сл} \approx 0,4q$, как в экспериментах профессора К.З. Ушакова [3], то по концентрации $C = 2/100 > C_M$ найдем

$$a_k = \frac{6,8C_M^2 \sqrt{S}}{Ri^{0,25}}. \quad (10)$$

Поставляя (10) в формулу (9), получим

$$D_y = D_0 + \frac{6,8C_M^2 Re}{Ri^{0,25}} \nu, \quad (11)$$

где $Re = u\sqrt{S} / \nu$ – число Рейнольдса;

ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

Таким образом, коэффициент вертикальной диффузии метана является функцией числа Рейнольдса и числа Ричардсона. Он также зависит от концентрации, поскольку усиливается обмен газов с притоком метана. Подставляя формулу (11) в (8) и выражая дебит метана через его концентрацию, получим

$$x_n = \frac{\delta^2 Ri^{0,25} \sqrt{S}}{6,8\pi (C_n - C_M)^2}, \quad (12)$$

где δ – относительная толщина слоевого скопления по отношению к высоте горной выработки.

Для нахождения толщины слоев метана разрешим формулу (9) относительно вертикальной координаты

$$y = 2\sqrt{a_k x} \left[\ln \frac{q_{сл}}{u\sqrt{\pi a_k S x} (C - C_M)} \right]^{0,5}. \quad (13)$$

Зная по формуле (12) длину слоя, представим зависимость (13) в виде

$$y = 2\sqrt{a_k x} \left[\ln(\sqrt{x_n / x}) \right]^{0,5}.$$

На рисунке 2 в безразмерных координатах представлена изолиния концентрации метана.

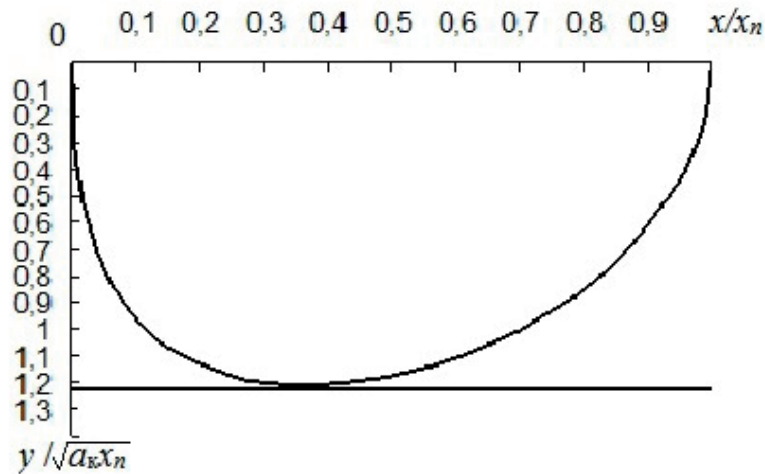


Рис. 2. Изолиния концентрации метана в слоевом скоплении горной выработки

Как видно из рисунка 2, максимальная толщина слоя метана наблюдается ближе к месту газовыделения (расположения суфляра и др.) на расстоянии $x = 0,35x_n$ и равна

$$h_n = 1,22\sqrt{a_k x_n},$$

где h_n – толщина слоевого скопления метана, м.

Слой начинался на расстоянии 20 м от лавы. Причина слоеобразования – повышенное газовыделение из кровли с дебитом более 1 м³/мин при скорости движения воздуха 0,5 м/с.

Моделирование аналитическим и численным методами конфигурации слоевых скоплений показало (рис. 3), что результаты расчетов (сплошные линии) удовлетворительно согласуются с данными (треугольники и кружочки) наблюдений профессора К.З. Ушакова на шахте № 1-5 в вентиляционной выработке, где был обнаружен слой метана с концентрацией 2 % длиной более 70 м.

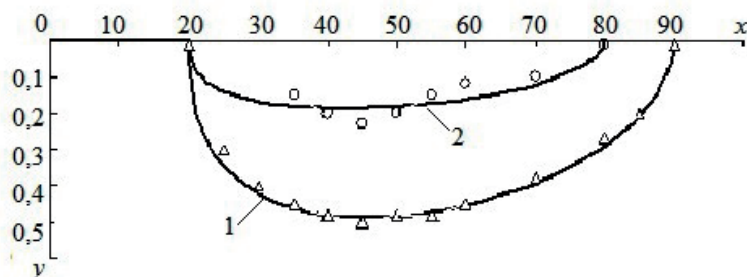


Рис. 3. Изолинии концентраций метана (1...2 % и 2...5 %) в вентиляционной выработке на шахте № 1-5 при суфлярном выделении из кровли

Таким образом, разработан численный метод расчета слоевого загазования метаном горных выработок. Согласованность (максимальная относительная

погрешность) результатов теоретических исследований с экспериментальными данными профессора К. З. Ушакова не превышает 14 %.

В качестве мер борьбы со слоевыми скоплениями метана в горных выработках шахт предлагаются способы увеличения расхода воздуха, в том числе местные непосредственно у слоевого скопления, путем:

- использования нагнетательных взвихрывающих воздушных трубопроводов (рис. 4), работающих от вентилятора местного проветривания или на сжатом воздухе шахтной пневмосети. Трубопроводы, имеющие отверстия для выпуска воздуха в виде свободных струй в подкровельное пространство, располагают в верхней части выработки. Свободные струи оказывают интенсивное турбулизирующее и вымывающее действие на слоевое скопление метана, разрушая его. Отверстия расположены двумя или тремя продольными рядами в шахматном порядке по длине трубопровода (расстояние между отверстиями составляет 1,0 м);

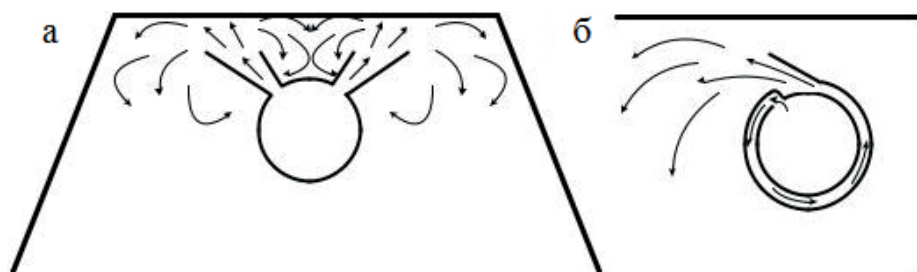


Рис. 4. Взвихрывающие воздушные трубопроводы:

а – выпуск воздуха из вентиляционной трубы в виде обычных свободных струй;
б – выпуск сжатого воздуха в виде закрученных свободных струй

- использования пневматических вентиляторов местного проветривания с перфорированными короткими трубопроводами (рис. 5);

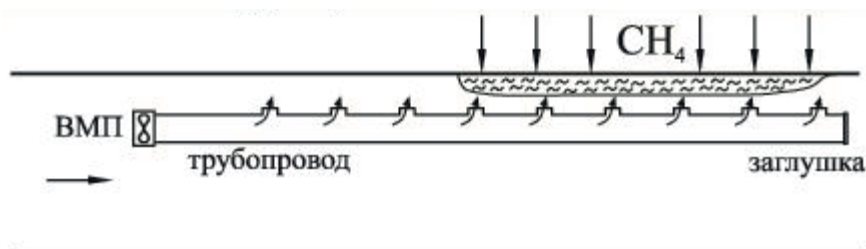


Рис. 5. Схема проветривания с помощью пневматических вентиляторов местного проветривания и перфорированными короткими трубопроводами

- установки поперечных и наклонных (под углом 45° по направлению движения воздуха) щитков, расположенных в верхней части выработки и направляющих дополнительную часть воздуха к кровле выработки. Между щитками шириной 1,0 м и кровлей должны быть оставлены зазоры высотой 0,2...0,3 м, а расстояние между ними – до 3,0 м [3]. В качестве примера на рисунке б представлены схемы расположения наклонных щитков в выработке;

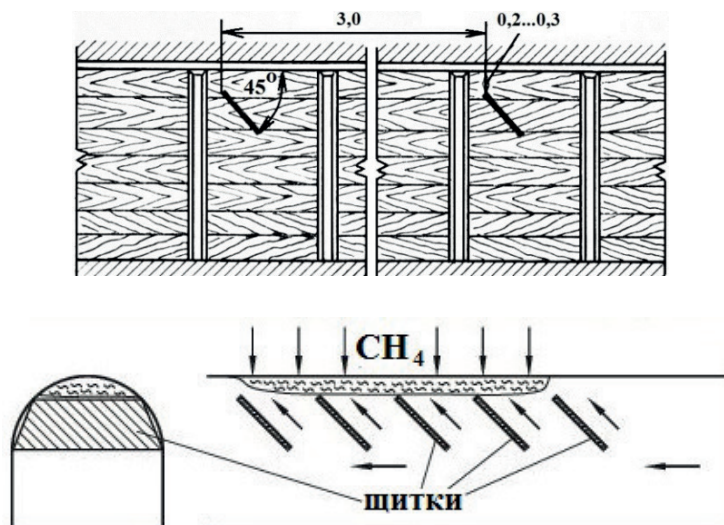


Рис. 6. Схемы расположения наклонных щитков в горной выработке

- использования легких дощатых и парусных перемычек (поперечных перегородок), перекрывающих нижнюю часть выработки (на 2/3 высоты) и вызывающих увеличение скорости воздуха вследствие его поджатия, при этом движущийся по выработке воздух направляют в подкровельное пространство (рис. 7);



Рис. 7. Схема монтажа перемычки в нижней части выработки

- использования продольных перегородок и вентиляторов местного проветривания пневматического типа (рис. 8). Пространство между кровлей и перегородкой проветривается вентилятором местного проветривания с помощью воздушного трубопровода;

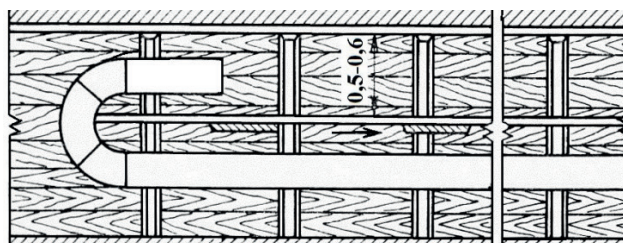


Рис. 8. Схема применения продольной перегородки для ликвидации слоевого скопления метана

- использования вентилятора местного проветривания с коротким трубопроводом, подвешиваемым у кровли выработки (рис. 9);

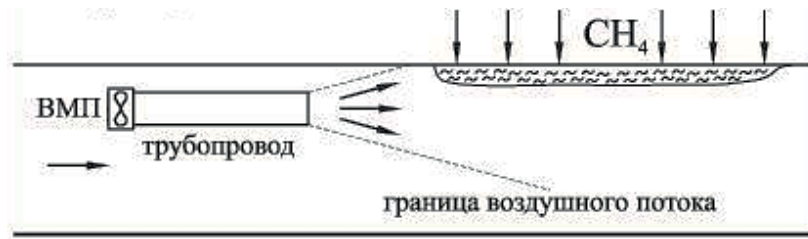


Рис. 9. Вентилятор местного проветривания с коротким трубопроводом

- использования продольных и поперечных каналов в бутовых полосах под вентиляционным штреком с камерами смешивания на штреке (рис. 10).

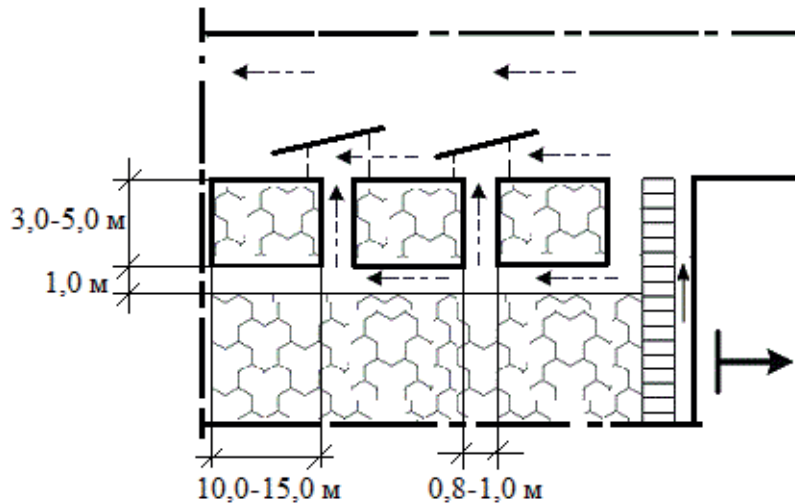


Рис. 10. Схема продольных и поперечных каналов в бутовых полосах под вентиляционным штреком с камерами смешивания на штреке

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Для определения слоевого загазования горных выработок шахт разработана математическая модель конвективной диффузии метана с учетом интенсивности источников газовыделения. Установлена зависимость длины и толщины метановых слоев от площади поперечного сечения горной выработки, скорости движения воздуха в ней и средней концентрации метана. Результаты расчета имеют достаточную сходимость с экспериментальными данными, следовательно, разработанный численный метод расчета может быть использован для прогноза формирования слоевых скоплений метана в горных выработках при учете совокупного влияния горнотехнических факторов, характеризующих геометрические размеры выработки, условия проветривания, дебит и кинематические характеристики метана, наличие источников газовыделения.

Предложены способы ликвидации слоевых скоплений в выработках угольных шахт, позволяющие повысить уровень безопасности труда шахтеров.

Перспективное направление дальнейших исследований – разработка двух- и трехмерных моделей массопереноса в горных выработках угольных шахт.

Список литературы / References

1. Яновский, А. Б. Основные тенденции и перспективы развития угольной промышленности России / А. Б. Яновский // Уголь. – 2017. – № 8. – С. 10 – 14.

Yanovskiy A. B. *Osnovnyye tendentsii i perspektivy razvitiya ugolnoy promyshlennosti Rossii* [Main tendencies and prospects of Russian coal mining industry development]. *Ugol*, 2017, no. 8, p. 10-14. (In Russian)

2. Ермолаев, А. М. Слоеые и местные скопления метана в тупиковых подготовительных выработках / А. М. Ермолаев // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2017. – № 4. – С. 33 – 40.

Yermolayev A. M. *Sloyevyye i mestnyye skopleniya metana v tupikovykh podgotovitelnykh vyrabotkakh* [Layer and local methane accumulations in dead-end winnings]. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti*, 2017, no. 4, pp. 33-40. (In Russian)

3. Ушаков, К. З. Газовая динамика шахт / К. З. Ушаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Изд-во МГГУ, 2004. – 481 с.

Ushakov K. Z. *Gazovaya dinamika shakht. 2-e izd., pererab. i dop.* [Gas dynamics of mines. The 2nd edition, revised and supplemented]. Moscow, MGGU Press, 2004, 481 p. (In Russian)

4. Брюханов, А. М. Формирование взрывоопасной среды в виде слоевых скоплений метана после внезапного выброса угольного массива и газа / А. М. Брюханов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2007. – № 13. – С. 137 – 144.

Bryukhanov A. M. *Formirovaniye vzryvoopasnoy sredy v vide sloyevykh skopleniy metana posle vnezapnogo vybrosa ugolnogo massiva i gaza* [Explosive atmosphere formation in the form of methane layer accumulations after sudden outburst of coal massif and gas]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2007, no. 13, pp. 137-144. (In Russian)

5. Агарков, А. В. Опасность слоевых скоплений легких и тяжелых газов в горных выработках угольных шахт при ведении аварийно-спасательных работ / А. В. Агарков // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – № 1(25). – С. 54 – 61.

Agarkov A. V. *Opasnost sloyevykh skopleniy legkikh i tyazhyolykh gazov v gornykh vyrabotkakh ugolnykh shakht pri vedenii avariyno-spasatelnykh rabot* [Hazard of layer accumulations of light and heavy gases in mine workings of coal

mines during conduction of emergency and rescue operations]. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity*, 2021, no. 1(25), pp. 54-61. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 30.03.2023

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

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

Aleksandr Mikhailovich Simonov, head of department; e-mail: simonov54_54@mail.ru;

Aleksandr Vladislavovich Agarkov, Cand. Sci. (Tech.), principle engineer;

e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru

State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"

of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence,

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-34

FORECASTING AND ELIMINATION OF METHANE LAYER ACCUMULATIONS IN COAL MINES

Purpose. To develop the method of forecasting and techniques for elimination of layer methane accumulations in mine workings of coal mines in order to provide occupational safety of miners.

Methods. There has been applied an integrated method of investigation consisted of literature sources analysis, theoretical investigations and comparison of results with data obtained empirically in the underground conditions of the coal mines. The mathematical modeling has been fulfilled applying the fundamental laws of mass transfer, theory of differential equations and numerical methods of their solution, mathematical statistics methods for processing the results of the investigations.

Results. The mathematical model has been elaborated showing methane layered yields in the mine workings and the effective methods for eliminating the strata methane accumulations in mines have been proposed.

Scientific novelty. There have been established the relations of the excessive methane layered yields in the mine workings which differ from the known ones by factoring in the cumulative influence of the mining parameters defining the size dimensions of the mine working, its ventilation conditions, yield and kinematic characteristics of methane, acting sources of gas discharge. The method for forecasting the strata gas yields in the mine workings and measuring length and width of the methane layers has been developed based on the relations.

Practical value. Application of the various methods for eliminating the layered methane accumulations in the mine workings will make it possible to improve occupational safety of miners conducting mining works at the junction of breakage faces with return airways and inside them. The proposed method of forecasting the gas levels content and techniques of eliminating the layered accumulations may be utilized in elaboration of regulatory documents and guidelines for the coal mining industry.

Keywords: coal mine; mine working; aerogasdynamics; strata methane accumulations forecasting; elimination of methane layers; occupational safety of miners.

УДК 622.822.22:001.891.572

*Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.ru;
Евгений Александрович Головченко, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: ennio_80@mail.ru
Государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 949) 340-97-96*

ДИНАМИКА АДСОРБЦИИ КИСЛОРОДА УГЛЕМ В ЗОНАХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАРУШЕНИЙ И ТЕМПЕРАТУРА ЕГО САМОНАГРЕВАНИЯ

Цель. Исследовать кинетику и динамику адсорбции кислорода газонасыщенными углями в зонах геологических нарушений для прогнозирования самонагревания угля.

Методы. Экспериментальные исследования кинетики и динамики адсорбции кислорода газонасыщенными углями и фенологический метод расчета параметров этого процесса.

Результаты. Исследованы кинетические кривые адсорбции и хемосорбции кислорода газонасыщенными углями, рассчитаны параметры их низкотемпературного окисления. С использованием метода вычислений скорости тепловыделения установлены возможные температуры в угольном скоплении при разных его геометрических параметрах.

Научная новизна. Предложен метод определения температур самонагревания в угольном скоплении с учетом его размеров на основе данных о кинетике адсорбции углями кислорода и скорости тепловыделения.

Практическая значимость. Проведенные исследования позволяют спрогнозировать самонагревание угля с учетом размера его потерь в зоне геологического нарушения.

Ключевые слова: адсорбция; кинетика; низкотемпературное окисление; температура угля; самонагревание угля.

Постановка проблемы. В работе [1] происшедшие за 15-летний период на шахтах Донбасса эндогенные пожары систематизированы по местам и условиям возникновения, схемам отработки выемочных участков, организации локального прогноза эндогенной пожароопасности по каждому выемочному участку для предотвращения эндогенных пожаров. Показано, что независимо от степени склонности углей к самовозгоранию возможно возникновение эндогенных пожаров в зонах геологических нарушений за счет того, что не учтены горно-геологические условия отработки пластов, параметры низкотемпературного окисления угля, адсорбционные процессы, происходящие в угольном скоплении.

Анализ последних исследований и публикаций. Теоретически и экспериментально несколькими авторами, в том числе П. С. Пашковским, Е. И. Глузбергом, В. Г. Агеевым и др., установлено, что пожароопасное гнездовое скопление угля за счет конвекции дает минимальный вынос теплоты и имеет скорость фильтрации воздуха в пределах $10^{-4} \dots 10^{-5}$ м/с, при большей скорости фильтрации теплотери за счет конвекции столь велики, что самонагревания угля не происходит; при малой же скорости выделяемого количества теплоты недостаточно для нагревания угля.

Теплопотери в очаге самонагрева угля за счет теплоотдачи зависят от конкретных условий нагрева пожароопасного скопления и могут быть установлены по известным формулам. Скорость тепловыделения и генерации теплоты в гнездовом скоплении угля подробно описана в работе [2]. Математическая модель кинетики хемосорбции кислорода ископаемыми углями приведена в работе [3]. Математическая модель нагрева скопления угля представлена в работе [4].

Цель работы. Исследовать кинетику и динамику адсорбции кислорода газонасыщенными углями в зонах геологических нарушений для прогнозирования самонагрева угля.

Результаты исследований. Для проведения экспериментов использовали угли разной степени метаморфизма ($V^{\text{daf}} = 9,4; 19,2; 26,6; 42\%$) фракции 0...3 мм. Концентрация кислорода в газоздушном смеси составляла 27 моль/м³.

Скорость фильтрации адсорбтива была равной пожароопасной и составляла $10^{-4} \dots 10^{-5}$ м/с. Скорость отработки сорбента определяли с учетом изменения концентраций кислорода по мере выполнения исследований, в течение 10...40 сут, до достижения величины 0,95...0,98 сорбционного равновесия.

При исследованиях экспериментальных кинетических кривых адсорбции кислорода [3, 5] определяли такие параметры низкотемпературного окисления угля, как критическая температура самовозгорания, энергия активации, коэффициенты адсорбции кислорода, коэффициент Генри, скорость окисления, количество кислорода, сорбированное углем по мере прохождения эксперимента, его величины, вступающие в реакции окисления, и скорость отработки сорбента [6].

В таблице 1 представлены результаты исследований кинетики окисления газонасыщенных углей шахт ДНР.

Таблица 1

Исследования кинетики окисления газонасыщенных углей шахт ДНР

Шахта им. С. М. Кирова, пласт l_1^B	Исходные данные							
	$V^{\text{daf}}, \%$	$J_0, \text{М}^3/\text{Т}$	$k_{\text{кр}} \cdot 10^9, \text{М}^3/(\text{с} \cdot \text{моль})$	$E, \text{Дж/моль}$	$\nu \cdot 10^9, \text{с}^{-1}$	D_p	$R_1 \cdot 10^4, \text{М}$	γ
	9,4	25	1,0	12831	5,6	8,3	7,5	1,8
	Результаты эксперимента							
	$\tau, \text{ч/с}$	12/43200	24/86400	48/172800	72/259200	120/432000	240/864000	
	$\mu \cdot 10^6, \text{с}^{-1}$	3,8	2,3	1,39	1,04	0,71	0,44	
	$\xi \cdot 10^3$	1,07	2,9	6,9	10,7	17,4	23,9	
	$u \cdot 10^6, \text{М/с}$	1,75	1,3	1,1	0,9	0,06	0,035	
	$a_{\text{погл}}^{(1)}$	39,59	41,25	45,7	47,07	47,46	47,6	
	$a_{\text{погл}}^{(2)}$	11,99	14,3	15,25	16,32	15,45	16,5	
	$a_{\text{хим}}^{(1)}$	30,5	30,3	28,4	24,5	16,6	11,1	
	$a_{\text{хим}}^{(2)}$	9,23	10,52	9,48	8,43	5,43	3,86	

Окончание табл. 1

Шахта им. Челюс- кинцев, пласт l_1^B	Исходные данные							
	V^{daf} , %	J_0 , м ³ /т	$k_{кр} \cdot 10^9$, м ³ /(с·моль)	E , Дж/моль	$\nu \cdot 10^9$, с ⁻¹	D_p	$R_1 \cdot 10^4$, м	γ
	42,6	10,5	1,1	29447	2,68	5,1	7,5	1,3
	Результаты эксперимента							
	τ , ч/с	12/43200	24/86400	48/172800	72/259200	120/43200	240/864000	
	$\mu \cdot 10^6$, с ⁻¹	1,33	1,22	1,02	0,83	0,23	0,13	
	$\xi \cdot 10^3$	2,8	8,89	24,5	41,3	130,6	116,1	
	$u \cdot 10^6$, м/с	3	2,5	2,25	2	1,25	1,25	
	$\frac{a_{погл}^{(1)}}{a_{погл}^{(2)}}$	$\frac{8,12}{2,81}$	$\frac{12,51}{4,33}$	$\frac{19,28}{6,68}$	$\frac{23,03}{7,93}$	$\frac{31,59}{10,35}$	$\frac{35,23}{10,22}$	
	$\frac{a_{хим}^{(1)}}{a_{хим}^{(2)}}$	$\frac{6,82}{2,42}$	$\frac{10,36}{3,52}$	$\frac{16,14}{5,52}$	$\frac{19,06}{6,5}$	$\frac{2,94}{7,52}$	$\frac{24,46}{7,1}$	

* Примечание: Для концентрации поглощенного $a_{погл}$ и прореагировавшего $a_{хим}$ с углем кислорода в числителе даны значения для $C_{O_2} = 27$ моль/м³; в знаменателе – для $C_{O_2} = 9,36$ моль/м³.

В таблице 1 использованы следующие обозначения:

V^{daf} – содержание горючих веществ в угле, %;

J_0 – газоносность угля, м³/т;

$k_{кр}$ – критическая константа скорости окисления угля, м³/(с·моль);

E – энергия активации, Дж/моль;

ν – константа скорости образования поверхностного комплекса, с⁻¹, которую определяют по зависимости

$$\nu = 6,1 \cdot 10^7 E^{-3,66},$$

μ – константа скорости выделения метана, с⁻¹, определяется по зависимости

$$\mu = a (\tau + 1)^n,$$

где $a = 0,0135(V^{daf})^{0,81}$;

$n = 0,0001(V^{daf})^2 - 0,008 V^{daf} - 0,65$;

ξ – доля поверхности угля, на которой происходит реакция окисления, вычисляемая по формуле

$$\xi = 1 - \exp(-\gamma\tau) + \left(\frac{\gamma+1}{\mu-\gamma} \right) [\exp(-\mu\tau) - \exp(-\gamma\tau)];$$

D_p – дробимость угля;

R_1 – радиус частиц угля, м;

u – скорость перемещения адсорбционного слоя, м/с;

$a_{\text{погл}}$ – количество кислорода, поглощенного углем, моль/м³;

$a_{\text{хим}}$ – количество кислорода, вступившего в реакцию окисления с углем, моль/м³.

Используя приведенные методики и результаты выполненных в НИИ «Респиратор» экспериментов, рассчитаем возможные температуры в гнездовом угольном скоплении для разных зон геологических нарушений.

Учитывая особенности низкотемпературного окисления и нагревания углей в шахтных условиях, в работах [4, 6] предложена математическая модель самонагрева угля

$$T = T_0 + \frac{QS}{\alpha\Pi}. \quad (1)$$

Согласно полученному решению повышение температуры угля в скоплении определяют по его геометрическим параметрам S и Π , удельному количеству выделяемой теплоты Q , Дж/(м³·с), и ее стоку за счет теплообмена с окружающей средой α , Вт/(м²·К). При этом теоретически и экспериментально обоснованы все выполненные при постановке и решении задачи упрощения, приводящие к минимально допустимым погрешностям. В то же время уточнен расчет теплоты Q .

При использовании формулы (1) в качестве параметра S , м², принимаем общую площадь скопления угля в геологическом нарушении (по данным геологической службы шахты), а в качестве параметра Π , м, – ее периметр.

Для анализа полученных данных положим, что скопление угля представлено кубом со сторонами длиной 1 м. Тогда $S = 6$ м², $\Pi = 12$ м, $S/\Pi = 0,5$. Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·К), примем равным 0,078 согласно исследованиям [6].

Скорость тепловыделения W_q , Дж/(м³·с), рассчитываем по формуле

$$W_q = q_0 k_{\text{кр}} a_{\text{хим}},$$

где $k_{\text{кр}}$ – критическая константа скорости окисления угля, с⁻¹;

$a_{\text{хим}}$ – концентрация поглощенного и прореагировавшего с углем кислорода, моль/м³;

q_0 – теплота реакции окисления, Дж/моль, определяемая по эмпирической формуле

$$q_0 = 69,8Qk_{\text{кр}}^{-0,82}.$$

Теплота Q подробно исследована в работе [3]. Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·К), определяют по следующей зависимости:

$$\alpha = 7\nu^{0,8},$$

где v – скорость омывания скопления угля, м/с, которая находится в зависимости от скорости подвигания линии очистного забоя $v_{\text{заб}}$, м/сут, и времени нахождения скопления в выработанном пространстве τ , сут, определяют по формуле

$$v = v_0 \exp(-5,54 \cdot 10^{-2} v_{\text{заб}} \tau),$$

где v_0 – скорость движения воздуха в забое, м/с.

Полагая, что $v_{\text{заб}} = 1$ м/сут; $v_0 = 3$ м/с; $\tau = 12 \dots 240$ ч, и используя данные таблицы 1, установим динамику температур самонагрева угля для двух шахт, для которых исследовали экспериментальные кинетические кривые адсорбции кислорода (табл. 2).

Таблица 2

Динамика температур самонагрева углей

Шахта им. С.М. Кирова	$V^{\text{daf}} = 9,4 \%$; $q_0 = 1,36 \cdot 10^6$ Дж/моль; $k_{\text{кр}} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ с}^{-1}$; $T_0 = 298 \text{ К}$; $V_0 = 3 \text{ м/с}$					
τ , ч/с	12/43200	24/86400	48/172800	72/259200	120/432000	240/864000
v , м/с	2,9	2,8	2,6	2,5	2,3	1,7
α , Вт/(м ² ·К)	16,4	15,3	15	14,5	12,6	10,7
$W_{q_0} \cdot 10^{-4}$, Дж/(м ³ ·с)	2,02	2,3	1,8	1,2	1,1	0,84
$Q = \xi W_{q_0}$, Дж/(м ³ ·с)	21,5	66	124	128	191,4	200
T , К	298,6	300	302	302,4	305,5	307,3
Шахта им. Челюскинцев	$V^{\text{daf}} = 42,6 \%$; $q_0 = 12,6 \cdot 10^3$ Дж/моль; $k_{\text{кр}} = 1,77 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; $T_0 = 298 \text{ К}$; $V_0 = 3 \text{ м/с}$					
τ , ч/с	12/43200	24/86400	48/172800	72/259200	120/432000	240/864000
v , м/с	2,9	2,8	2,6	2,5	2,3	1,7
α , Вт/(м ² ·К)	16,4	15,3	15	14,5	12,6	10,7
$W_{q_0} \cdot 10^{-4}$, Дж/(м ³ ·с)	0,54	0,79	1,23	1,44	1,68	1,58
$Q = \xi W_{q_0}$, Дж/(м ³ ·с)	15	70	301	594	2194	1832
T , К	298,5	300,3	308	318,5	385	383

Из таблицы 2 следует, что температуры угля для его скоплений в горных выработках возможно рассчитать при условии, что частицы в скоплении будут иметь такие же размеры, как в лабораторном реакторе (0...3 мм). При большем размере частиц скорость истечения из них метана будет меньшей, а процесс адсорбции кислорода – более длительным. Поэтому результат расчета

динамики температур угля в его скоплении в шахте согласно лабораторным исследованиям будет завышенным и не может быть применен ко всему его объему, а только для гнездовых скоплений, если они там имеются.

Приблизительные расчеты самонагрева угля в скоплениях разных размеров на примере экспериментальных данных кинетики хемосорбции кислорода углем шахты им. С.М. Кирова приведены на рисунке 1.

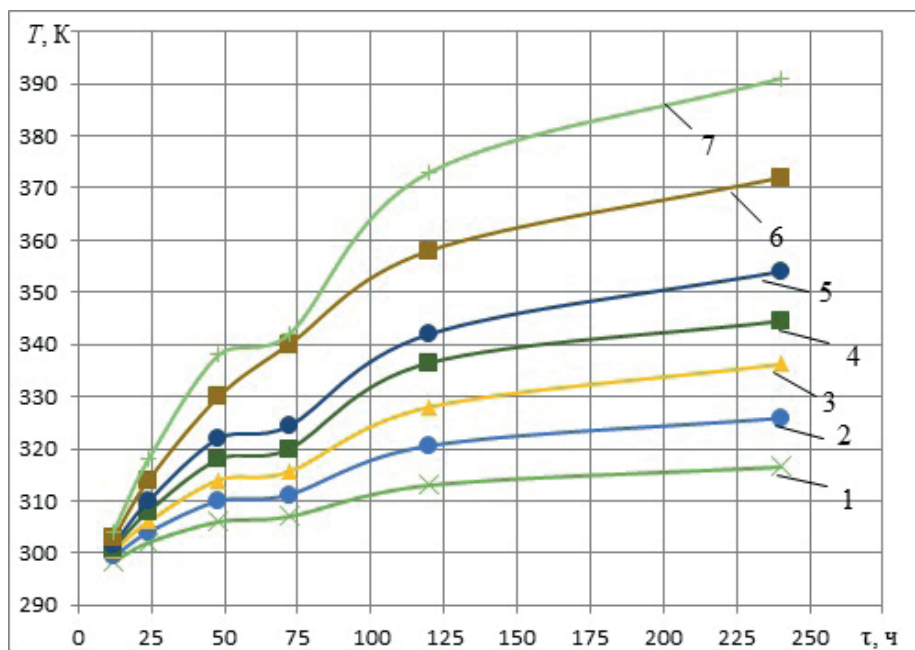


Рис. 1. Динамика температуры скопления угля шахты им. С.М. Кирова при различных отношениях S/Π :
1 – 1 м; 2 – 1,5 м; 3 – 2 м; 4 – 2,5 м; 5 – 3 м; 6 – 4 м; 7 – 5 м

Согласно данным таблицы 1 скорость отработки сорбента $u = 1,7 \cdot 10^{-6}$ м/с близка к пожароопасной скорости фильтрации воздуха через скопление угля в выработках шахт. За 10 сут уголь шахты им. С.М. Кирова на 90...95 % был хемосорбирован кислородом в реакционной колонке по длине 0,05 м. Результаты исследований поглощения кислорода, полученные в лабораторных условиях для других величин расстояний от входа кислорода в реакционную колонку, в относительных величинах $\bar{a}_{\text{хим}}/a_0$ следующие:

Величина	Расстояние, м				
	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3
$x, \text{ м}$	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3
$\bar{a}_{\text{хим}}/a_0$	0,87	0,58	0,25	0,055	0,005

Следовательно, можно полагать, что температуры в скоплении угля по пути проникновения в него воздуха будут располагаться аналогичным образом в момент времени $\tau = 10$ сут. Для более длительного периода возможно

проводить расчеты по данным кинетики скопления углей, найденным при исследовании кинетических кривых их хемосорбции.

Выводы. Исследованы кинетика и динамика хемосорбции газонасыщенных углей кислородом воздуха с его концентрациями 27 и 9,36 моль/м³ и определены температуры в скоплениях углей разных размеров двух степеней метаморфизма. Показано влияние размера скопления на кинетику температур.

Проведенные исследования позволяют спрогнозировать самонагревание угля с учетом размера его потерь в зоне геологического нарушения.

Список литературы / References

1. Возникновение эндогенных пожаров на шахтах ДНР, их обнаружение и профилактика / В. Г. Агеев, С. П. Греков, А. М. Симонов, А. А. Всякий // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2020. – № 2(57). – С. 7 – 14.

Ageyev V. G., Grekov S. P., Simonov A. M., Vsyakiy A. A. *Vozniknoveniye endogennykh pozharov na shakhtakh DNR, ikh obnaruzheniye i profilaktika* [Spontaneous underground fires occurrence in mines of the DPR, the detection and prevention of them]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2020, no. 2(57), pp. 7-14. (In Russian)

2. Греков, С. П. Исследование кинетики теплового эффекта окисления газонасыщенных углей Донбасса / С. П. Греков, Е. А. Головченко // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2022. – № 4(59). – С. 66 – 74.

Grekov S. P., Golovchenko Ye. A. *Issledovaniye kinetiki teplovogo effekta okisleniya gazonasyshchennykh ugley Donbassa* [Investigation of oxidation heat effect kinetics of gas-saturated Donbass coal]. *Nauchnyy vestnik NII "Respirator"*, 2022, no. 4(59), pp. 66-74. (In Russian)

3. Греков, С. П. Математическое моделирование параметров хемосорбции кислорода ископаемыми углями / С. П. Греков, В. П. Орликова // Международная научно-практическая конференция «Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов» (Новокузнецк, 3 – 7 июня 2022 г.). – Новокузнецк, 2022. – С. 325 – 328.

Grekov S. P., Orlikova V. P. *Matematicheskoye modelirovaniye parametrov khemosorbtsii kislороda iskopayemyimi uglyami* [Mathematical modeling of parameters of chemisorption of oxygen by black coal]. *Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispolzovaniya mineralnykh resursov"* (Novokuznetsk, 3-7 iyunya, 2022). Novokuznetsk, 2022, pp. 325-328. (In Russian)

4. Агеев, В. Г. Профилактика эндогенной пожароопасности / В. Г. Агеев, П. С. Пашковский, С. П. Греков. – Донецк, 2020. – 590 с.

Ageyev V. G., Pashkovskiy P. S., Grekov S. P. *Profilaktika endogennoy pozharоopasnosti* [Prevention of spontaneous fire hazard]. Donetsk, 2020, 590 p. (In Russian)

5. Влияние химической активности угля на выделение газов при низкотемпературном окислении / В. А. Портола, В. И. Храмцов, В. А. Щербаклова, А. А. Бобровникова // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 5. – С. 63 – 67.

Portola V. A., Khramtsov V. I., Shcherbakova V. A., Bobrovnikova A. A. *Vliyanie khimicheskoy aktivnosti uglya na vydeleniye gazov pri nizkotemperaturnom okislenii* [Influence of coal chemical activity on gas emission during low-temperature oxidation]. *Vestnik KuzGTU*, 2017, no. 5, p. 63-67. (In Russian)

6. Пашковский, П. С. Актуальные вопросы борьбы с самонагреванием угля / П. С. Пашковский, С. П. Греков, И. Н. Зинченко. – Донецк, 2012. – С. 654.

Pashkovskiy P. S., Grekov S. P., Zinchenko I. N. *Aktualnye voprosy borby s samonagrevaniyem uglya* [Actual problems of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, 2012, 654 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 27.01.2022

*Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior scientific researcher; e-mail: obep.niigd@list.ru;
Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, Can. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: ennio_80@mail.ru
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 949) 340-97-96*

DYNAMICS OF OXYGEN ADSORPTION BY COAL IN GEOLOGICAL DISTURBANCE ZONES AND COAL SPONTANEOUS HEATING TEMPERATURE

Purpose. To investigate the kinetics and dynamics of adsorption of oxygen by gas-saturated coal in geological disturbance zones in order to predict the spontaneous heating of coal.

Methods. Experimental investigations of kinetics and dynamics of oxygen adsorption by the gas-saturated coal and phenological method for calculating the parameters of this process.

Results. The kinetic curves of adsorption and chemisorption of oxygen by the gas-saturated coal have been investigated, the parameters of their low-temperature oxidation have been calculated. Applying the method for calculating the heat emission rate the possible temperatures in coal accumulation have been determined factoring in the various geometrical parameters.

Scientific novelty. The method for determination of the spontaneous heating temperatures in the coal accumulation taking into account its dimensions based on data of the kinetics of oxygen adsorption by coal and the heat emission rate has been presented.

Practical value. The conducted investigations enable predicting the risk of spontaneous heating of coal factoring in the amount of its losses in the zone of geological disturbances.

Keywords: *adsorption; kinetics; low-temperature oxidation; coal temperature; coal spontaneous heating.*

УДК 622.822.7:[614.842.612:614.844.2]"Завесы"

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

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

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-40

ВЛИЯНИЕ НАПРАВЛЕННОСТИ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ В ВОДЯНОЙ ЗАВЕСЕ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ

Цель. Установить зависимость дальности подачи водяной завесы от направления потоков пожарных газов и скорости испарения капель для повышения эффективности локализации подземных пожаров.

Методы. Теоретический анализ, приближенное аналитическое интегрирование дифференциальных уравнений.

Результаты. Установлена зависимость дальности подачи водяной завесы от скорости испарения капель и направления потоков пожарных газов в горной выработке.

Научная новизна. Впервые показано, что скорость испарения капель, направление потока пожарных газов существенно влияют на дальности подачи водяной завесы.

Практическая значимость. Направление факела завесы по потоку пожарных газов повышает эффективность локализации подземных пожаров.

Ключевые слова: дальности подачи водяной завесы; скорость испарения; поток пожарных газов; направление завесы; локализация подземных пожаров.

Постановка проблемы. Водяные завесы как противопожарные средства, согласно терминологии А. Г. Виноградова [1], выполняют две функции:

- профилактическую противопожарную – при необходимости создания препятствия на пути распространения возможных пожаров при условии их возникновения (локализация пожара);
- защитную – снижение действия опасных факторов пожара на людей и материальные ценности (ослабление лучистого и конвективного тепловых потоков, осаждение дыма и продуктов горения, охлаждение воздуха и твердых поверхностей аварийного помещения).

Основные задачи устройства водяных завес на пути распространения подземных пожаров – предотвращение возможности проникновения огня и охлаждение пожарных газов ниже температуры воспламенения горючих материалов в горной выработке. Защитную функцию по локализации пожара завесы выполняют и на других подземных протяженных объектах (галереях, кабельных каналах и т.д.).

Еще в конце 60-х годов прошлого века в НИИ «Респиратор» была разработана переносная установка для создания завес ВВР-1, которая до сих пор находится на вооружении ГВГСС МЧС ДНР.

Установка состоит из специального трубчатого тройника, входное отверстие которого оборудовано пожарной гайкой, а два выходных отверстия – резьбами для ввинчивания полидефлекторных распылителей.

Специальным зажимным приспособлением установка фиксируется в сечении выработки на крепи или на бортах шахтной вагонетки в горизонтальном положении с факелом, раскрытым навстречу потоку пожарных газов, исходящих из очага пожара.

Параметры образуемой завесы рассчитывают по Методике определения параметров водяных завес. Однако заложенные при разработке этой Методики упрощения стали причиной существенного отклонения расчетов от реальных параметров. Установки оказались малоэффективными. Так, за последние 10 лет согласно анализу аварий и горноспасательных работ на предприятиях, обслуживаемых подразделениями ГВГСС, в шахтах Украины и ДНР установки для создания завес применялись в 40 из 65 пожаров, происшедших за этот период, то есть практически на каждом втором пожаре. При этом 65 % установленных завес были преодолены пожаром.

К недостаткам эксплуатируемых в угольных шахтах установок локализации пожара (УВЗ, ВВР-1 и др.) относятся: несоответствие расходных характеристик распылителей требуемым по условиям пожара значениям; неэффективность создаваемых завес; малая дисперсность; неравномерность заполнения каплями факела, а следовательно, и сечения выработки и т.д.

Одна из причин – не учтено взаимодействие факела завесы с потоком пожарных газов и вследствие этого завеса ориентирована неправильно, то есть установлена против потоков пожарных газов. Параметры траектории движения капель рассчитывают для неподвижной воздушной среды. Это существенно упрощает математический аппарат, используемый в Методике, но делает ее неадекватной объекту исследования.

Анализ последних публикаций. Динамика испарения капли была рассмотрена в монографиях [2–5]. Там было введено предположение, что уменьшение радиуса капли за счет ее испарения пропорционально времени ее движения, однако взаимодействие испаряющейся капли с воздушным потоком анализировалось в рамках определения эффективной дальности подачи огнетушащего вещества на очаг пожара. Влияние направления завесы по отношению к внешнему потоку воздуха на эффективность охлаждения потока не рассматривалась. В работе [6] учитывались вторичные воздушные потоки. Возникновение этих потоков, совпадающих с направлением движения капель, значительно увеличивает дальность подачи завесы. В данной работе рассматривается взаимодействие капли с потоком пожарных газов и влияние этого взаимодействия на дальность подачи завесы.

Влияние направления факела завесы на эффективность охлаждения внешнего потока воздуха не рассматривалось.

Цель работы – установить зависимость дальности подачи водяной завесы от направления потоков пожарных газов и скорости испарения капель для повышения эффективности локализации подземных пожаров.

Изложение основного материала. Представим траектории капель водяной завесы в виде совокупности отдельных линий. На отдельную каплю действует в общем случае сила тяжести, реактивная сила, обусловленная убыванием массы испаряющейся при движении капли, сила аэродинамического сопротивления, которую представим в виде пропорциональной степенной зависимости от скорости обтекания капли воздушным потоком с показателем степени $\nu \geq 0$. При $\nu = 0$ имеем линейную модель сопротивления, при $\nu = 0,5$ – квадратичную модель сопротивления. Не учитываем взаимодействие капель в завесе. В силу того что капля испаряется равномерно по всей поверхности, суммарный вектор реактивной силы равен $\vec{R}_{\text{реакт}} = 0$.

Тогда движение капли описываем системой линейных дифференциальных уравнений [7, 8]

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{\alpha}{r_0 - \gamma\tau} (\dot{x} + V_{\text{п}}) \left[(\dot{x} + V_{\text{п}})^2 + \dot{y}^2 \right]^{\nu} = 0; \\ \ddot{y} + \frac{\alpha}{r_0 - \gamma\tau} \dot{y} \left[(\dot{x} + V_{\text{п}})^2 + \dot{y}^2 \right]^{\nu} = g. \end{cases} \quad (1)$$

С начальными условиями:

$$\begin{aligned} x(0) &= y(0) = 0; \\ \dot{x}(0) &= V_1; \dot{y}(0) = V_2. \end{aligned}$$

где r_0 – начальный радиус капли, м;

γ – скорость убывания радиуса капли при испарении, м/с;

α – коэффициент аэродинамического сопротивления;

$V_{\text{п}}$ – скорость горизонтального воздушного потока, м/с;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

V_1 – составляющая скорости капли по оси x , м/с;

V_2 – составляющая скорости капли по оси y , м/с.

Положительным значениям скорости $V_{\text{п}} > 0$ соответствует встречный газоздушный поток, а отрицательным $V_{\text{п}} < 0$ – попутный поток.

Система (1) представляет собой задачу Коши, аналитическое решение которой при $\nu > 0$ не представляется возможным.

На начальном этапе движения капли скорость $V_2 \ll V_1$, можно пренебречь слагаемым \dot{y}^2 по сравнению с $(\dot{x} + V_{\text{п}})^2$.

Тогда первое уравнение системы (1) примет вид

$$\dot{x} + \frac{\alpha}{r_0 - \gamma\tau} (\dot{x} + V_{\text{п}})^{2\nu+1} = 0. \quad (2)$$

Интегрируя уравнение (2), получаем

$$\dot{x}(\tau) = \left[\frac{1}{(vV_1 + V_n)^{2v}} - \frac{2v\alpha}{\gamma} \ln \left(1 - \frac{\gamma\tau}{r_0} \right) \right]^{-\frac{1}{2v}} - V_{II}.$$

Дальность подачи водяной завесы $L_{зав}$, м, найдем по формуле

$$L_{зав} = \int_0^{\tau_k} \dot{x}(\tau) d\tau, \quad (3)$$

где τ_k – время жизни капли воды, с,

$$\tau_k = \min(\tau_{осед}; \tau_{исп}) = \begin{cases} \tau_{исп}, & \text{если } \tau_{исп} < \tau_{осед}; \\ \tau_{осед}, & \text{если } \tau_{осед} < \tau_{исп}, \end{cases}$$

где $\tau_{исп}$ – время испарения капли, с;

$\tau_{осед}$ – время оседания капли, с.

Если капля воды с начальным радиусом r_0 , м, и начальной температурой T_0 , К, нагревается при прохождении через поток пожарных газов с температурой T_Γ , К, то время ее нагревания до температуры кипения воды T_K , К, составляет

$$\tau_H = \frac{1}{3} \frac{\rho_B c_B}{\alpha_T} \ln \frac{T_\Gamma - T_0}{T_\Gamma - T_K},$$

где ρ_B – плотность воды, кг/м³;

c_B – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

α_T – коэффициент теплоотдачи пожарных газов к воде, Вт/(м²·К);

$$\alpha_T = \frac{\lambda}{r_0} \left(1 + 0,08 \text{Re}^{\frac{2}{3}} \right),$$

где λ – коэффициент теплопроводности газов, Вт/(м²·К);

Re – критерий Рейнольдса.

Для капель размером $d_k < 500$ мкм

$$0,08 \text{Re}^{\frac{2}{3}} \ll 1.$$

Поэтому $\alpha_T \approx \frac{\lambda}{r_0}$ и время нагревания капли составит

$$\tau_H = \frac{1}{3} \frac{r_0^2 \rho_B c_B}{\lambda} \ln \frac{T_\Gamma - T_0}{T_\Gamma - T_K}.$$

Время кипения капли $\tau_{\text{кип}}$, с, определим следующим образом:

$$\tau_{\text{кип}} = \frac{\rho_w Q_w r_0^2}{\lambda (T_\Gamma - T_K)},$$

где Q_w – удельная теплота испарения, $Q_w = 2,35 \cdot 10^6$ Дж/кг.

Общее время испарения капли $\tau_{\text{исп}}$, с, находим по формуле

$$\tau_{\text{исп}} = \tau_n + \tau_{\text{кип}}.$$

Если рассматривать каплю как сферическое тело, то для малых чисел Рейнольдса установившаяся скорость ее оседания с момента вылета из распылителя вычисляется по формуле

$$V_2 = \frac{2}{9} \frac{\rho_w - \rho_\Gamma}{\eta} g r_0^2,$$

где ρ_Γ – плотность газа, кг/м³;

η – динамическая вязкость газа, Па·с.

При $T_\Gamma = 1000$ К, $\eta = 48,4 \cdot 10^{-6}$, Па·с [7].

Время оседания капли на почву $\tau_{\text{осед}}$, с, составит

$$\tau_{\text{осед}} = \frac{H}{V_2},$$

где H – высота расположения распылителя установки, м.

Интеграл (3) не выражается в элементарных функциях. Проведем его приближенное аналитическое интегрирование, принимая $\nu = 0,5$ (квадратичное сопротивление движению капли).

Подынтегральное выражение принимает вид

$$\dot{x}(\tau) = \left[\frac{1}{V_1 + V_n} - \frac{\alpha}{\gamma} \ln \left(1 - \frac{\gamma \tau}{r_0} \right) \right]^{-1} - V_{\text{п}}. \quad (4)$$

Ввиду малости величины $\frac{\gamma \tau}{r_0}$ разложим в выражении (4) логарифмическую функцию в ее степенной ряд, ограничившись двумя первыми членами

$$\ln(1-x) \cong -\frac{x}{1} - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \frac{x^4}{4} - \dots$$

Тогда дальность подачи завесы L_3 , м (длина зоны охлаждения), составит

$$L_3 = \frac{r_0^2}{\gamma \alpha} \int_0^{\tau_k} \frac{d\tau}{\tau^2 + \frac{r_0}{\gamma} \tau + \frac{r_0^2}{\gamma \alpha (V_1 + V_{II})}} - \int_0^{\tau_k} V_{II} d\tau = \frac{2r_0}{\alpha} \sqrt{\frac{4\gamma - (V_1 + V_{II})}{\alpha \gamma}} \operatorname{arctg} \frac{2\tau_k - \frac{r_0}{\gamma}}{\sqrt{\frac{4\gamma - (V_1 + V_{II})}{\alpha \gamma}}} - V_{II} \tau_k.$$

Рассчитаем дальность подачи завесы при разных скоростях воздушного потока в горной выработке и разном направлении завесы – по потоку и против потока пожарных газов.

Расчет производим для установки локализации подземных пожаров «Бус-1», разработанной в ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР».

Параметры образуемой завесы следующие.

Размер капель $d_0 = 300$ мкм, давление в противопожарном трубопроводе $P = 0,6$ МПа, сечение выработки $S = 10,5$ м², высота выработки $H_{\text{выр}} = 3,5$ м, скорость потока пожарных газов $V_{II} = (0 \div 5)$ м/с, $\gamma = 1 \cdot 10^{-4}$ с, $\nu = 0,5$. Коэффициент α принимаем по работе [8] из выражения $\alpha(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = 0,144$ м²/с², $T_r = 1000$ К.

Рассчитываем $V_1 = 8,5$ м/с, $V_2 \cong 0$, $\tau_n = 0,085$ с, $\tau_{\text{кип}} = 0,81$ с, $\tau_{\text{исп}} = 0,82$ с, $V_{\text{ос}} = 2,11$ м/с, $\tau_{\text{ос}} = 0,83$ с, $\tau_k = 0,82$ с.

Данные расчетов дальности подачи водяной завесы в зависимости от скорости потока пожарных газов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Дальность подачи водяной завесы при встречном потоке пожарных газов

V_{II} , м/с	0	1	2	3	4	5
L_3 , м	6,9	6,7	6,2	6,0	5,8	5,3

Таблица 2

Дальность подачи водяной завесы при попутном потоке пожарных газов

V_{II} , м/с	0	-1	-2	-3	-4	-5
L_3 , м	6,9	7,2	7,5	7,9	8,1	8,3

Расчеты показывают, что скорость потоков пожарных газов и направление завесы существенно влияют на ее дальность подачи: встречный поток уменьшает дальность подачи завесы, а попутный – увеличивает ее. Поскольку при прочих равных условиях эффективность локализации пожара зависит

от дальности подачи завесы, то ее направление по потоку повышает эффективность локализации в среднем на 30,5 %.

Выводы. Предложенная теоретическая модель позволяет учитывать нелинейность силы сопротивления движению испаряющейся капли, а также действие встречного или попутного потока пожарных газов, исходящих из очага пожара.

Направление завесы по потоку пожарных газов повышает эффективность локализации подземных пожаров на 30 %.

Список литературы / References

1. Виноградов, А. Г. Поглощение лучистого теплового потока в распыленной водяной струе : диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук / А. Г. Виноградов. – Чебоксары, 2012. – 146 с.

Vinogradov A. G. *Pogloshchenie luchistogo teplovogo potoka v raspylennoy vodyanoy strue : dissertatsiya na soiskanie uchyonoy stepeni kandidata fiziko-matematicheskikh nauk* [Absorption of radiant heat flux in sprayed water jet : Candidate of physics and mathematics sciences dissertation. Vinogradov Anatoly Grigoryevich]. Cheboksary, 2012. 146 p. (In Russian)

2. Абрамов, Ю. А. Моделирование процессов в шахтных стволах / Ю. А. Абрамов, В. Е. Росоха, Е. А. Шаповалова. – Харьков : Фолио, 2001. – 195 с.

Abramov Yu. A., Rosokha V. E., Shapovalova Ye. A. *Modelirovaniye protsessov v shakhtnykh stvolakh* [Simulating the processes in mine shafts]. Kharkov, Folio Publ., 2001. 195 p. (In Russian)

3. Севриков, В. В. Автоматические быстродействующие системы пожарной защиты / В. В. Севриков, В. А. Карпенко, И. В. Севриков. – Киев ; Севастополь : СевГТУ, 1996. – 260 с.

Sevrikov V. V., Karpenko V. A., Sevrikov I. V. *Avtomaticheskie bystrodeystvuyushchie sistemy pozharной zashchity* [Rapid automated fire protection systems]. Kiev; Sevastopol, SevGTU Press, 1996. 260 p. (In Russian)

4. Ольшанский, В. П. Приближенные методы расчета гидравлических пожарных струй / В. П. Ольшанский, В. М. Халыпа, О. А. Дубовик. – Харьков : Митець, 2004. – 116 с.

Olshanskiy V. P., Khalypa V. M., Dubovik O. A. *Priblizhyonnye metody raschyota gidravlicheskih pozharных struy* [Approximate methods for calculating the hydraulic hose streams]. Kharkov, Mytets Publ., 2004. 116 p. (In Russian)

5. Ольшанский В. П. О нелинейной модели падения испаряющейся капли / В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // Коммунальное хозяйство городов. – 2006. – Вып. 67. – С. 351 – 357.

Olshanskiy V. P., Olshanskiy S. V. *O nelineynoy modeli padeniya isparayushcheysya kapli* [On non-linear model of fall of evaporating droplet]. *Kommunalnoye khozyaystvo gorodov*, 2006, issue 67, pp. 351-357. (In Russian)

6. Виноградов, А. Г. Учет вторичных воздушных потоков при математическом моделировании распыленных водяных струй / А. Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 2, № 2. – С. 29 – 33.

Vinogradov A. G. *Uchyot vtorichnykh vozdushnykh potokov pri matematicheskom modelirovani raspylyonnykh vodyanykh struy* [Factoring the secondary air flows in mathematical modeling of sprayed water streams]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 29-33. (In Russian)

7. Шароварников, А. Ф. Влияние дисперсности капель воды на эффективность тушения пожаров горючей жидкости / А. Ф. Шароварников, Д. А. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 12. – С. 69 – 74.

Sharovarnikov A. F., Korolchenko D. A. *Vliyaniye dispersnosti kapel vody na effektivnost tusheniya pozharov goryuchey zhidkosti* [Effect of water droplets dispersability on the efficiency of suppressing the flammable liquids fires]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2013, vol. 22, no. 12, pp. 69-74.

8. Ольшанский, В. П. Моделирование движения испаряющейся капли огнетушащего вещества с учетом встречного или попутного воздушного потока / В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский // Пожарная безопасность. – 2005. – № 6. – С. 168 – 174.

Olshanskiy V. P. *Modelirovaniye dvizheniya isparayushcheysya kapli ognetyushashchego veshchestva s uchyotom vstrechnogo ili poputnogo vozdushnogo potoka* [Modeling the motion of evaporating droplet of firefighting agent factoring in the reversed or cocurrent air flow]. *Pozharnaya bezopasnost*, 2005, no. 6, pp. 168-174. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 16.05.2023

*Andrey Yuryevich Kolyada, Cand. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: kolyada1980@mail.ru;
Igor Feliksovich Dikenshteyn, scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”
238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-40*

EFFECT OF WATER SCREEN DROPLETS MOTION DIRECTION ON EFFECTIVENESS OF UNDERGROUND FIRES CONTAINMENT

Purpose. To determine the dependence of the water screen delivery distance on the direction of fire gases flow and the rate of droplets evaporation in order to improve the effectiveness of underground fires containment.

Methods. Theoretical analysis, approximate analytical integration of differential equations.

Results. The dependence of the water screen delivery distance on the droplets evaporation rate and the fire gasses flow direction in a mine working has been established.

Scientific novelty. For the first time it has been demonstrated that the droplets evaporation rate and the fire gases flow direction both significantly affect the water screen delivery distance.

Practical value. The direction of protective screen discharge lengthwise the fire gases flow improves the effectiveness of underground fires containment.

Keywords: *water screen delivery distance; evaporation rate; fire gases flow; screen orientation; underground fires containment.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 622.822.22:001.891.572

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

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

Евгений Александрович Головченко, канд. техн. наук, нач. отд.; e-mail: ennio_80@mail.ru

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-83, (+7 949) 340-97-96

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ САМОВОЗГОРАНИЯ УГОЛЬНЫХ СКОПЛЕНИЙ В ШАХТАХ

Цель. Разработать метод определения температуры угольных скоплений с момента самовозгорания, учитывая их геометрические параметры, для обеспечения безопасности работ.

Методы. Экспериментальные исследования кинетических параметров окисления углей кислородом воздуха и аналитический расчет ожидаемой температуры самовозгорания угля на основе теплового баланса.

Результаты. Исследованы параметры адсорбции и хемосорбции кислорода газонасыщенными углями, определены параметры низкотемпературного окисления угля в зонах геологических нарушений. Установлена зависимость для прогнозирования ожидаемой температуры в угольном скоплении различных размеров.

Научная новизна. Полученная аналитическая зависимость позволяет исследовать динамику температур самонагрева угля, процесс реакции окисления и теплоотдачи в окружающую среду с учетом размеров скопления.

Практическая значимость. Разработанный метод позволяет обеспечить безопасные условия разработки пластов с различными геологическими нарушениями и предупреждать самовозгорание в угольных скоплениях.

Ключевые слова: самовозгорание; тепловыделение; теплоотдача; кинетика; динамика; температура; угольное скопление.

Постановка проблемы. Низкотемпературное окисление углей – длительный процесс, по времени составляющий 10 суток и более, исследуемый в лабораторных условиях путем определения параметров адсорбции углями кислорода и моделирования процесса окисления углей с использованием математических моделей, отвечающих физическим причинам.

В условиях угольных шахт, например, при переходе очистным забоем различных типов зон геологических нарушений во многих случаях остается часть угля, что является причиной возникновения эндогенных пожаров в 30 % случаев. Поэтому для своевременного предупреждения самовозгорания угля в каждом конкретном случае необходимо определить эндогенную пожароопасность оставленного угольного скопления, учитывая параметры низкотемпературного окисления угля, полученные ранее в лабораторных

условиях, и характеристики разрабатываемого пласта, либо аналогичных по характеристике других уже заранее изученных угольных пластов.

Анализ последних исследований и публикаций. В ГБУ «НИИ «Респиратор» вопросы низкотемпературного окисления углей изучаются много лет. Известны фундаментальные работы В. С. Веселовского, В. Я. Альперовича, П. С. Пашковского, В. Г. Игишева, В. Г. Агеева [1–3].

Созданные лабораторные установки и математическое моделирование самовозгорания угля по значительным объемам экспериментальных данных по кинетике сорбции кислорода газонасыщенными углями различных марок позволили впервые разработать метод разделения кинетики поглощенного и прореагировавшего с углем кислорода и получить численные значения параметров хемосорбции кислорода при низкотемпературном окислении [4, 5].

Цель исследования – разработать метод определения температуры самовозгорания оставленного угольного скопления с момента его образования, учитывая его геометрические параметры, для обеспечения безопасности работ.

Результаты исследований. Для выявления степени влияния геологических нарушений на эндогенную пожароопасность образовавшегося угольного скопления выполнены исследования теплообменных процессов в зонах геологических нарушений [1], результаты которых позволили разработать метод определения эндогенной пожароопасности.

Для выполнения расчетов принимали во внимание все основные виды геологических нарушений, встречающиеся в шахтах Донбасса (рис. 1).

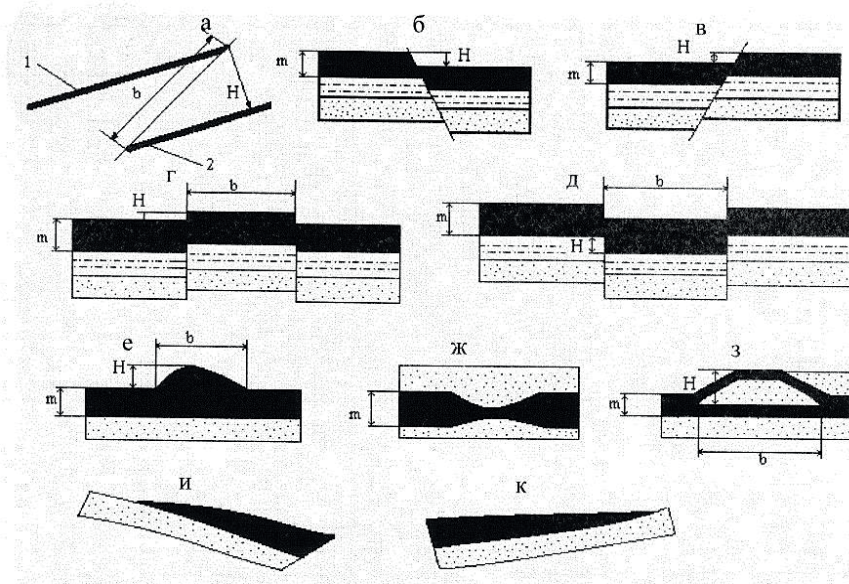


Рис. 1. Виды геологических нарушений, встречающиеся в шахтах Донбасса: а, в – взброс; б – сброс; г – горст; д – грабен; е – утолщение пласта угля; ж – утончение пласта; з – раздвоение пласта; и – сдвиг; к – надвиг; 1 – висячее крыло; 2 – лежащее крыло; b – амплитуда смещения пласта по простиранию; m – толщина пласта; H – амплитуда смещения пласта по нормали

При расчетах использовали получаемые от геологической службы шахты данные и результаты экспериментальных исследований углей из пластов с геологическими нарушениями, выполняемых в лаборатории ГБУ «НИИ «Респиратор».

Исходные данные:

- плотность угля ρ_y , т/м³;
- газоносность угля G_d , т/м³;
- тип геологического нарушения;
- толщина оставляемой пачки угля, м;
- тип пород кровли пласта;
- тип пород почвы пласта;
- мощность пласта m , м;
- содержание летучих веществ (доля горючих) в угле V^{daf} , %;
- объемная доля технологических потерь угля β (при отсутствии данных может быть принята равной 0,1) [6];
- коэффициенты теплопроводности вмещающих пород кровли λ_k и почвы пласта λ_n , Вт/(м·К). В случае отсутствия исходных данных можно воспользоваться таблицей 1 [1, 3]

Таблица 1

Коэффициенты теплопроводности пород в скоплении угля

Вид породы	Значение λ , Вт/(м·К)
Известняк средней крепости	1,30
Известняк и песчанистый сланец	1,03
Глинистый сланец крепкий	0,26
Глинистый и углистый сланцы	0,19
Глинистый сланец слабой крепости	0,13

- длина лавы, м;
- расстояние от места поступления воздуха в глубь угольного скопления по ходу движения утечек воздуха до места с максимально возможной температурой в нем, м, принимают равным 1 м;
- время от момента образования угольного скопления τ_c , сут;
- концентрация кислорода в месте угольного скопления C_0 , моль/м³ (без учета разбавления его метаном принимают равной 9,36 моль/м³).

Параметры лабораторных исследований углей и теплофизические константы:

- константа скорости химической реакции окисления угля $k_{кр}$, с⁻¹;
- дробимость угля D_p ;
- критическая температура самовозгорания угля $T_{кр}$, К;

- плотность воздуха ρ_y , кг/м³;
- удельная теплоемкость воздуха C_p , Дж/(кг·К);
- диаметр частиц угля в скоплении d , м, принимается согласно [1, 3] равным $d = 0,015$ м.

Ожидаемую температуру в скоплении угля определяют по формуле

$$T = T_0 + \frac{QS}{\alpha\Pi},$$

где T_0 – начальная температура угля, К;

Q – удельное количество выделяемой теплоты, Дж/(м³·с);

S – площадь скопления угля, м², по данным геологической службы шахты;

Π – периметр скопления угля, м, по данным геологической службы шахты;

α – коэффициент теплоотдачи скопления угля в окружающую среду, Вт/(м²·с).

Удельное количество выделяемой теплоты Q , Дж/(м³·с), определяют по формуле

$$Q = Q_{\text{ок}} - Q_{\text{м}} - Q_{\text{вл}},$$

где $Q_{\text{м}}$ – удельное количество теплоты поглощенной углем в результате дросселирования из него метана, Дж/(м³·с), определяют по формуле

$$Q_{\text{м}} = \delta q_{\text{др}} J_{\text{м}},$$

δ – доля выделяющегося метана, ее определяют по формуле

$$\delta = \frac{1}{V^{daf} + 1},$$

$q_{\text{др}}$ – теплота дросселирования метана из угля, Дж/моль, которую определяют по формуле

$$q_{\text{др}} = 630(D_p - 1)^{1,3},$$

$J_{\text{м}}$ – интенсивность выделения метана из угля, моль/(м³·с), определяют в зависимости от газоносности пласта G_d , т/м³, по формуле

$$J_{\text{м}} = 1,9 \cdot 10^{-4} \cdot G_d,$$

$Q_{\text{ок}}$ – удельное количество теплоты при окислении угля, Дж/(м³·с), находят по зависимости

$$Q_{\text{ок}} = \xi k_{\text{кр}} a_{\text{хим}} q_0 = \xi W_{q0},$$

ξ – доля реакционной поверхности угля, вступившей в реакцию окисления, находят по зависимости

$$\xi = [-3 \cdot 10^{-21} \tau^3 - 3 \cdot 10^{-14} \tau^2 + 7 \cdot 10^{-8} \tau - 0,0009] \times \\ \times [0,0002(V^{daf})^3 - 0,0156(V^{daf})^2 + 0,3561 V^{daf} - 1,4146],$$

τ – время реакции, с;

$a_{\text{хим}}$ – концентрация адсорбированного кислорода, вступившего в реакцию окисления с углем, моль/м³, находят по формуле

$$a_{\text{хим}} = a_{\text{погл}} [0,0015 (V^{daf})^2 - 0,0642 V^{daf} + 0,6741],$$

$a_{\text{погл}}$ – концентрация поглощенного углем кислорода, моль/м³, определяют по формуле

$$a_{\text{погл}} = \gamma C_p,$$

γ – коэффициент Генри, определяют по зависимости

$$\gamma = 0,0066(V^{daf})^2 + 0,3325 V^{daf} - 0,4886,$$

q_0 – теплота реакции окисления, Дж/моль, определяют по формуле

$$q_0 = 6980 k_{\text{кр}}^{-0,81},$$

$Q_{\text{вл}}$ – удельное количество теплоты для испарения из угля влаги, Дж/(м³·с), определяют по формуле

$$Q_{\text{вл}} = \frac{q_{\text{в}} K_{\text{в}} \rho_{\text{у}}}{0,018},$$

$q_{\text{в}}$ – теплота испарения влаги, Дж/моль, принимают равной 150 Дж/моль;

$K_{\text{в}}$ – скорость испарения влаги, с⁻¹, принимают равной $1,058 \cdot 10^{-7}$, с⁻¹;

$\rho_{\text{у}}$ – плотность угля, кг/м³.

Коэффициент теплоотдачи скопления угля в окружающую среду α , Вт/(м²·с) определяют по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{пр}}}{V_{\text{пож}}} (V + 1),$$

$V_{\text{пож}}$ – критическое по самовозгоранию угля значение мощности оставляемого угольного скопления, м, принимают равным 0,2;

$\lambda_{\text{пр}}$ – приведенная теплопроводность, Вт/(м·К), определяют по зависимости

$$\lambda_{\text{пр}} = \varepsilon \lambda_{\text{в}} + (1 - \varepsilon) \lambda_{\text{пор}},$$

$\lambda_{\text{в}}$ и $\lambda_{\text{пор}}$ – теплопроводность воздуха и окружающих пород, Вт/(м·К), соответственно, $\lambda_{\text{пор}}$ определяют для разного типа пород по формуле

$$\lambda_{\text{пор}} = (\lambda_{\text{к}} + \lambda_{\text{п}})/2,$$

ε – коэффициент порозности скопления угля, определяют по зависимости

$$\varepsilon = \frac{0,48}{1 + D_{\text{р}} / 75},$$

V – скорость омывания воздухом скопления угля, м/с, определяют в зависимости от скорости подвигания линии очистного забоя $V_{\text{заб}}$, м/сут, и времени образования скопления угля в выработанном пространстве по формуле

$$V = V_0 \exp(-5,54 \cdot 10^{-2} V_{\text{заб}} \tau_c),$$

V_0 – скорость потока воздуха в забое, м/с.

Предположим, величина скопления угля в зоне геологического нарушения может быть представлена в виде параллелепипеда, в котором площадь скопления угля S , м², равна площади сторон и определяется по формуле

$$S = 2mb + 2ml + 2lb,$$

где m – мощность оставленного скопления угля, м;

b – ширина оставленного скопления угля, м,

l – длина оставленного скопления, м.

Периметр скопления угля Π , м, равняется периметру сторон и определяется по формуле

$$\Pi = 4b + 4l + 4m.$$

Выводы. На основании проведенных экспериментальных исследований по кинетике адсорбции кислорода углями Донбасса установлена аналитическая

зависимость для прогноза ожидаемой температуры в угольном скоплении с учетом его геометрических размеров.

Список литературы / References

1. Пашковский, П. С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк : Ноулидж, 2013. – 792 с.

Pashkovskiy P. S. *Endogennyye pozhary v ugolnykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ., 2013. 792 p. (In Russian)

2. Игишев, В. Г. Современное состояние проблемы борьбы с эндогенными пожарами в шахтах Кузбасса / В. Г. Игишев, С. А. Син // Уголь. – 2012. – № 7. – С. 30 – 38.

Igishev V. G., Sin S. A. *Sovremennoye sostoyaniye problemy borby s endogennymi pozharami v shakhtakh Kuzbassa* [Current state of a problem with fighting the spontaneous fires in Kuznetsk Basin mines]. *Ugol*, 2012, no. 7, pp. 30-38. (In Russian)

3. Агеев, В. Г. Профилактика эндогенной пожароопасности : монография / В. Г. Агеев, П. С. Пашковский, С. П. Греков. – Донецк, 2020. – 592 с.

Ageyev V. G., Pashkovskiy P. S., Grekov S. P. *Profilyaktika endogennoy pozharoопасnosti : monografiya* [Prevention of spontaneous fire hazard : monograph]. Donetsk, 2020. 592 p. (In Russian)

4. Греков, С. П. Исследование кинетики теплового эффекта окисления газонасыщенных углей Донбасса / С. П. Греков, Е. А. Головченко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2022. – № 4(59). – С. 66 – 74.

Grekov S. P., Golovchenko Ye. A. *Issledovaniye kinetiki teplovogo effekta okisleniya gazonasyshchennykh ugley Donbassa* [Investigation of oxidation heat effect kinetics for gas-saturated coals of Donets basin]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2022, no. 4(59), pp. 66-74. (In Russian)

5. Греков, С. П. Расчет температуры самонагрева угля / С. П. Греков, В. П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2020. – № 3(57). – С. 26 – 35.

Grekov S. P., Orlikova V. P. *Raschyot temperatury samonagrevaniya uglya* [Calculation of coal spontaneous heating temperature]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2020, no. 3(57), pp. 26-35. (In Russian)

6. Влияние химической активности угля на выделение газов при низкотемпературном окислении / В. А. Портола, В. И. Храмцов, В. А. Щербакова, А. А. Бобровникова // Вестник КузГТУ. – 2017. – № 5. – С. 63 – 67.

Portola V. A., Khramtsov V. I., Shcherbakova V. A., Bobrovnikova A. A. *Vliyanie khimicheskoy aktivnosti uglya na vydeleniye gazov pri nizkotemperaturnom okislenii* [Effect of coal chemical activity on gas emission under low-temperature oxidation]. *Vestnik KuzGTU*, 2017, no. 5, pp. 63-67. (In Russian)

Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: niigd@mail.ru;

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior scientific researcher; e-mail: obep.niigd@list.ru;

Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, Cand. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: ennio_80@mail.ru

State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”

of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-83, (+7 949) 340-97-96

DETERMINATION OF SPONTANEOUS COMBUSTION TEMPERATURE OF COAL ACCUMULATIONS IN MINES

Purpose. To develop a method for determining the coal accumulations temperature since the moment of their spontaneous combustion factoring in their size-shape factors in order to provide occupational safety.

Methods. The experimental investigations of the kinetic parameters of coal oxidation by oxygen from ambient air and the analytical computation of predicted temperature of coal spontaneous combustion based on the enthalpy balance equation.

Results. The parameters of adsorption and chemisorption of oxygen by gas-saturated coals have been investigated; the parameters of low-oxidation of coal in the areas of geological disturbances have been defined. The dependence for forecasting the predicted temperature in coal accumulation of various sizes has been established.

Scientific novelty. The derived analytical dependence allows investigation of the coal spontaneous heating temperatures dynamics, the reaction process of oxidation and heat transfer in the ambient environment taking account into the size-shape factors of accumulations.

Practical value. The elaborated method makes it possible to provide the safe workplace for development of the seams with various geological disturbances and to prevent spontaneous combustion in coal accumulations.

Keywords: *spontaneous combustion; heat emission; heat transfer; kinetics; dynamics; temperature; coal accumulation.*

УДК 543.544.3:547.532/.3

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

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

Оксана Николаевна Щербакова, вед. инж.; e-mail: astra-jasmin@mail.ru

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856)332-78-55

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕФТЕПРОДУКТОВ

Цель. Разработать методику обнаружения и последующей идентификации остатков светлых нефтепродуктов во фрагментах, изъятых с места пожара, для повышения достоверности определения инициаторов горения.

Методы. Исследования газообразных проб методами аккумулятивной и газожидкостной хроматографии. Математическая обработка данных, оценка показателей точности измерений.

Результаты. Разработаны сорбенты для рабочей и контрольной насадочных колонок. Экспериментальным путем определены наиболее рациональные условия разделения нефтепродуктов: количество неподвижной жидкой фазы, температура и длина колонки, расход газоносителя. Установлены критерии идентификации: время удерживания группового пика бензина, керосина и дизельного топлива, а также индивидуальных пиков толуола, параксилола, ортоксилола. Рассчитаны расширенная неопределенность, пределы допускаемой относительной погрешности измерений и порог обнаружения остатков бензина, керосина и дизельного топлива.

Научная новизна. Впервые разработана методика газохроматографического обнаружения и идентификации близких по углеводородному составу нефтепродуктов в вещественных доказательствах, изымаемых с места пожара, с применением метода аккумулятивной газовой хроматографии.

Практическая значимость. Главная отличительная особенность методики – сочетание низкого порога обнаружения (10^{-10} г/см³) с экспрессностью и простотой исполнения. Высокая чувствительность метода позволила исключить экстракцию и концентрирование проб. Использование контрольной колонки повышает достоверность результатов исследования. Область применения методики – пожарно-технические исследования фрагментов, изъятых с места пожара, для установления причин возникновения пожаров.

Ключевые слова: *аккумулятивная хроматография; бензин; дизельное топливо; керосин; методика обнаружения и идентификации; групповой пик.*

Постановка проблемы. Основными объектами пожарно-технических исследований остаются наиболее распространенные и доступные для поджигателей светлые нефтепродукты – бензин, керосин, дизельное топливо или их смеси [1], которые представляют собой сложные соединения, содержащие различные группы углеводородов: алифатические, циклические, ароматические, предельные, непредельные и др. Аналитическая задача обнаружения и последующей идентификации средств поджога усложняется, особенно при пожарно-технических исследованиях, ввиду их присутствия в следовых количествах на различных объектах-носителях (ткань, грунт,

древесина, стекло, пластик, пожарный мусор и др.). Поэтому для исследования нефтепродуктов целесообразно изучить определенную группу углеводородов, типичную для всех нефтепродуктов [3].

В компонентный состав нефтепродуктов в разных соотношениях входят ароматические углеводороды, физические свойства которых (температура кипения, летучесть паров и др.) позволяют выделить их в качестве тестовых для обнаружения и идентификации инициаторов горения нефтяной природы при пожарно-технических исследованиях. Для того чтобы исследование оказалось результативным, необходимо наличие приборной базы и аналитических методик для решения отдельных конкретных задач: выявление специфических признаков и свойств объектов, их описание, сравнение и выполнение других необходимых действий. При этом применяют высокочувствительные методы анализа, обеспечивающие наиболее полное, всестороннее и результативное исследование вещественных доказательств – обгоревших фрагментов ткани, древесины, строительных материалов, пожарного мусора, содержащих остатки инициатора горения в ультрамалых количествах – на уровне 10^{-6} мкг/см³, в соответствии со специальными методиками, разработанными лабораторией [2, 3].

Разработка и внедрение в лабораторную практику новых методик анализа с низкими порогами обнаружения остатков инициаторов горения, составляющих доказательную базу результатов пожарно-технических исследований, в настоящее время – актуальная научная проблема.

Анализ последних исследований. На современном этапе отсутствуют стандартные методики обнаружения и идентификации следов инициаторов горения, а в существующих нет четких порогов обнаружения инициаторов горения в пробах, изъятых с места пожара, что обуславливает актуальность данного исследования.

Цель исследования – разработка методики обнаружения и последующей идентификации остатков светлых нефтепродуктов во фрагментах, изъятых с места пожара, для повышения достоверности определения инициаторов горения.

Изложение основного материала. При разработке методики в качестве главных критериев приняты низкий порог обнаружения, простота, экспрессность и информативность. Общая структура текста документа включала: область применения, краткое описание методики, порядок извлечения остатков легковоспламеняющихся жидкостей с объекта-носителя и подготовки пробы к анализу, перечень химических реактивов и материалов, оборудования и условий газохроматографического анализа, процедуру приготовления сорбента, критерии идентификации бензина, керосина, дизельного топлива, общий вид и обработку хроматограмм, ссылки на нормативные документы и литературные источники.

В процессе разработки методики извлечение остатков нефтепродуктов с объектов-носителей выполняли в специальном герметичном контейнере путем десорбции газов и паров жидкостей без экстракции и концентрирования проб. Для исследования образовавшейся в контейнере паровоздушной смеси использовали метод аккумулятивной газовой хроматографии [4–6].

Главное отличие метода аккумулятивной хроматографии от классической хроматографии заключается не в разделении сложной углеводородной смеси на многочисленные компоненты, а в получении группового аналитического сигнала бензина, керосина и дизельного топлива.

Для надежности идентификации нефтепродуктов, близких по углеводородному составу, удалось отделить сигналы ряда ароматических углеводородов (толуол, параксиллол, ортоксиллол) от группового сигнала, что легло в основу разработанной методики. Хроматограммы с четким групповым пиком и выделенными индивидуальными пиками ароматических углеводородов соответствуют «отпечаткам пальцев» бензина, керосина и дизельного топлива.

Для экспериментальных исследований были приготовлены и испытаны шесть хроматографических колонок различного состава (табл. 1).

Таблица 1

Состав хроматографических колонок

Номер колонки	Твердый носитель	Количество жидкой фазы
1	Инертон AW-DMCS	7 % масс. сквалана
2	Инертон AW-DMCS	3 % масс. сквалана
3	Хроматон N-AW	15 % масс. полигликольдипината
4	Хроматон N-AW	10 % масс. апиезона L
5	Хроматон N-AW	15 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э
6	Зольные алюмосиликатные микросферы	Без модифицирования жидкой фазой

Исследование подготовленных колонок (табл. 1) проводили при одинаковых условиях хроматографирования: температура термостата колонки (изотермический режим) 130 °С, детектора 190 °С, испарителя 200 °С, скорость потока газа-носителя (гелия) 30 мл/мин, воздуха 300 мл/мин и водорода 30 мл/мин. Для каждой колонки получены хроматограммы, определено время удерживания групповых и индивидуальных пиков веществ.

Результаты предварительных экспериментов показали, что на колонке с зольными алюмосиликатными микросферами выход нефтепродуктов происходит одним общим пиком, что не решает поставленной задачи

идентификации. При сравнении разделительной способности колонок № 1, 2, 3 и 4 установлено, что наиболее эффективное формирование группового пика и отделение от него ароматических углеводородов обеспечила колонка № 3 с хроматоном N-AW, модифицированным 15 % масс. полигликольдипината.

Исходя из этого, на колонке № 3 исследовано влияние количества неподвижной жидкой фазы, температуры и длины колонки, скорости газаносителя на значение времени удерживания группового пика и индивидуальных пиков ароматических углеводородов. Результаты исследования позволили оптимизировать условия формирования группового пика бензина, керосина, дизельного топлива с наиболее отличительными значениями времени удерживания группового пика и отделения от него индивидуальных пиков ароматических углеводородов.

Результаты исследования по оптимизации хроматографических параметров показали, что получение максимально отличительных хроматограмм бензина, керосина и дизельного топлива возможно при соблюдении следующих условий:

- длина колонки – 3 м;
- сорбент – хроматон, модифицированный 15 % масс. полигликольдипината, фракция 0,25...0,315 мм;
- температура термостата колонки – 120 °С;
- скорость потока гелия – 40 мл/мин;
- скорость воздуха – 300 мл/мин;
- скорость водорода – 30 мл/мин.

Отпечаток групповой хроматограммы (см. рис.), время удерживания группового пика бензина, керосина, дизельного топлива, а также индивидуальных пиков толуола, параксилола и ортоксилола (табл. 2) – главные критерии идентификации нефтепродуктов в разработанной методике.

Таблица 2

Время удерживания компонентов исследуемых нефтепродуктов

Нефтепродукт	Время удерживания, с			
	групповой пик	толуол	параксилол	ортоксилол
хроматон N-AW с 15 % масс. полигликольдипината				
Бензин	23	35	43	49
Керосин	33	–	43	–
Дизельное топливо	28	–	43	49

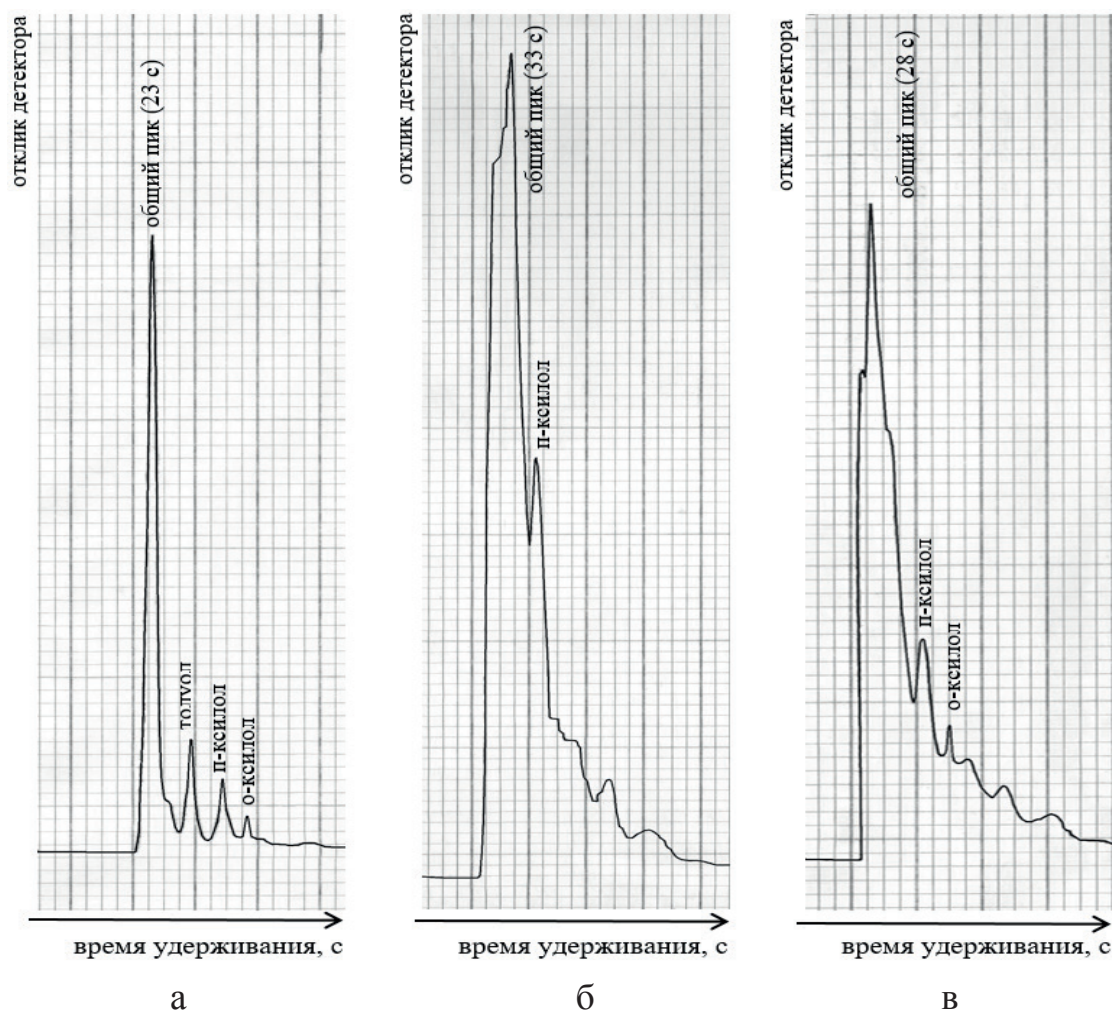


Рис. Хроматограммы группового разделения нефтепродуктов на колонке с ПЭГА после оптимизации:
 а – бензин; б – керосин; в – дизельное топливо

Разделительная способность колонки № 5 (хроматон N-AW, модифицированный 15 % масс. полифенилового эфира 5ф-4э) позволила принять ее в качестве контрольной для подтверждения присутствия в анализируемой пробе ароматических углеводородов.

По результатам экспериментальных исследований получены исходные данные для анализа показателей точности методики. Точность результатов измерений времени удерживания хроматографических пиков подтверждена пятикратной повторяемостью опытов для каждого исследуемого вещества. Установлены основные источники, которые могут влиять на формирование показателей точности измерений: погрешность секундомера, хроматографа и оператора (исследователя). Рассчитана расширенная неопределенность измерений времени удерживания пиков исследуемых веществ при коэффициенте охвата $k = 2$, предполагая прямолинейный закон распределения величин. Определены доверительные границы погрешности измерений времени удерживания пиков при доверительной вероятности $p = 0,95$.

Метод предполагает обнаружение и идентификацию инициаторов горения, находящихся в следовых количествах, поэтому в рамках исследования обязательным был расчет порога обнаружения бензина, керосина и дизельного топлива.

Объединенные данные по показателям точности измерений, полученные с использованием разработанной методики, представлены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели точности измерений методики

Вещество	Порог обнаружения, г/см ³	Расширенная неопределенность измерений времени удерживания пика, с	Предел допускаемой относительной погрешности измерений времени удерживания пика, %
Бензин	$5,44 \times 10^{-10}$	0,8	± 1,9
Керосин	$2,09 \times 10^{-10}$		± 1,6
Дизельное топливо	$6,52 \times 10^{-10}$		± 2,0
Толуол	–		± 1,3
Параксиллол	–		± 1,0
Ортоксилол	–	0,9	± 1,4

Вывод. Разработана методика с низким порогом обнаружения бензина, керосина и дизельного топлива (10^{-10} г/см³) в пробах после пожара, которая прошла метрологическую аттестацию и внесена в реестр аттестованных методик. Пожарно-технические исследования с применением методики позволяют решать главную и наиболее сложную задачу пожарных экспертиз – надежную идентификацию 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 ispolzovaniya pozharno-tekhnicheskimi spetsialistami sovremennykh sposobov obnaruzheniya i issledovaniya sredstv dlya podzhoga* [Problems and prospects of applying the contemporary methods of detection and investigation of arson accelerants by the fire investigation experts]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii*, 2017, no. 2(23), pp. 72-77. (In Russian)

2. Галишев, М. А. Система подготовки аналитической информации для экспертно-криминалистического исследования нефтепродуктов в пожарно-технической экспертизе / М. А. Галишев, А. С. Павлова // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2016. – № 4(21). – С. 95 – 97.

Galishev M. A., Pavlova A. S. *Sistema podgotovki analiticheskoy informatsii dlya ekspertno-kriminalisticheskogo issledovaniya nefteproduktov v pozharno-tekhnicheskoy ekspertize* [System of analytics preparation for forensic expertise of oil products in fire investigation]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii*, 2016, no. 4(21), pp. 95-97. (In Russian)

3. Красильников, А. В. Метод парофазного газохроматографического анализа светлых нефтепродуктов / А. В. Красильников, Ф. А. Дементьев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2018. – № 3(38). – С. 77 – 82.

Krasilnikov A. V., Demytyev F. A. *Metod parofaznogo gazokhromatograficheskogo analiza svetlykh nefteproduktov* [Technique of headspace gas chromatography for light oil products]. *Nauchnye i obrazovatelnye problemy grazhdanskoy zashchity*, 2018, no. 3(38), pp. 77-82. (In Russian)

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». – 2016. – № 1(53). – С. 40 – 49.

Kozlitin A. A., Lebedeva V. V., Nepochatykh I. N., Lukomskaya T. M. *Vybor sorbenta dlya ekspressnogo opredeleniya gazokhromaticheskim metodom initsiatorov goreniya v probakh s mesta pozhara* [Selection of sorbent for flash chromatography analysis of accelerants in samples collected at the fire scene]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2016, no. 1(53), pp. 40-49. (In Russian)

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

Kozlitin A. A., Lebedeva V. V. *Obnaruzhenie i identifikatsiya ostatkov nefteproduktov posle pozharov* [Detection and identification of oil products residues after the fires]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2018 no. 3(55), pp. 68-73. (In Russian)

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. Щербаклова // Вестник Института гражданской защиты Донбасса. – 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 legkovosplamenyayushchikhsya zhidkostey metodom gazovoy khromatografii*

[Investigation of possibility to determine highly flammable liquids by gas chromatography]. *Vestnik Instituta grazhdanskoy zashchity Donbassa*, 2015, issue 2(2), pp. 38-44. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 24.03.2023

Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;
Viktoria Valentinovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;
Oksana Nikolayevna Shcherbakova, principle engineer; e-mail: astra-jasmin@mail.ru
State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"
of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"
238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-55

TECHNIQUE OF DETECTION AND IDENTIFICATION OF OIL PRODUCTS

Purpose. To develop a technique for detection and further identification of the light oil products residues in the fragments collected at a fire scene in order to enhance the accuracy of determination of the accelerants type.

Methods. Investigations of the gaseous samples applying the methods of accumulative and gas-liquid chromatography. Mathematical processing of data, assessment of the measurement accuracy indices.

Results. The sorbents for the test and control tubes have been developed. The most rational conditions for the separation of oil products have been determined experimentally, i.e. the amount of stationary liquid phase, the column temperature and length, flow rate of the inert support. The criteria of the identification have been established for the retaining period of group peak response of petrol, kerosene and diesel fuel oil as well as for the individual response peaks of toluene, paraxylene, ortoxylyene. The expanded uncertainty, the relative acceptable error limits and the residue of petrol, kerosene and diesel fuel oil detection threshold have been computed.

Scientific novelty. There has been developed a novel chromatography technique for detection and identification of the allied hydrocarbonaceous oil products in the pieces of evidence collected at the fire scene applying the accumulative gas chromatography.

Practical value. The key distinctive feature of the technique is a combination of a low threshold of detection (10^{-10} g/cm³) with speed and simplicity of execution. The high sensitivity of the technique permitted to avoid the extraction and concentration of the samples. The utilization of the control tube increases the accuracy of the investigation results. The field of application of the technique includes fire and technical investigations of the fragments collected at the fire scene for determination of the causes of fires.

Keywords: *accumulative chromatography; petrol; diesel fuel oil; kerosene; detection and identification technique; group peak response.*

УДК 622.236.9

Олег Кузьмич Мороз, канд. техн. наук, проф.; e-mail: okmoroz@rambler.ru

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: (+7 856) 301-09-47

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

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-43

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД НЕВЗРЫВЧАТЫМИ РАЗРУШАЮЩИМИ СОСТАВАМИ КАК СРЕДСТВА ПОВЫШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Цель. Установить возможность применения невзрывного способа разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок с учетом особенностей теплового режима для повышения безопасности подземных горных работ.

Методы. Экспериментальные исследования невзрывного способа разрушения горных пород в условиях карьера и в подземных горных выработках, установление параметров предлагаемого способа.

Результаты. Приведены результаты исследования механизма разрушения прочных пород невзрывчатыми разрушающими составами и опыт их испытаний в условиях открытых горных работ при разрушении негабаритных блоков гранита и подземных горных выработок при подрывке пород почвы, представленных прочными песчаниками.

Научная новизна. Предложен безопасный способ разрушения горных пород в условиях выработок с исходящей струей воздуха, в стесненных условиях рабочего пространства вблизи работающего оборудования, а также при разрушении пород, вмещающих выбросоопасные пласты угля и песчаников. Этот способ не требует остановки работ основного цикла и не оказывает опасного динамического воздействия на окружающий выработку горный массив.

Практическая значимость. Предложенный способ подрывки прочных пород почвы, основанный на ее невзрывном разрушении, может быть рекомендован для внедрения в подземных горных выработках с породами почвы, имеющими прочность на одноосное сжатие более 60 МПа.

Ключевые слова: невзрывной способ разрушения горных пород; подземные горные выработки; горные породы; невзрывчатые разрушающие составы; подрывка почвы.

Постановка проблемы и ее связь с научными и практическими исследованиями. На практике в основном применяют буровзрывной способ разрушения горных пород при разработке полезных ископаемых как открытым, так и закрытым способом, а также при подземном строительстве. Его достоинства – высокая разрушающая способность, мобильность и универсальность. Но у данного способа есть и недостатки. Помимо шума, значительного объема выделенных газообразных продуктов взрыва это высокая стоимость и необходимость соблюдения особых мер безопасности при хранении, перевозке и использовании взрывчатых составов. Чтобы уменьшить

вышеназванные недостатки используют специальные способы мягкого взрывания и различные конструкции шпуровых зарядов. Например, применение способа мягкого взрывания с помощью пластиковых зарядов [1] (зарядные трубки типа «Гранилен») обеспечивает безопасность и минимальный уровень затрат на разрушение пород благодаря низкой чувствительности к механическим воздействиям, технологичности заряжения шпуров, теплоте взрыва, равной 1500 кДж/кг, при скорости детонации 1800 м/с. Для реконструкции зданий и сооружений в ограниченных условиях городской застройки, ведения аварийно-спасательных работ при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций и в других особых случаях в последнее время все чаще стали применять следующие статические способы разрушения горных пород: способ разрушения механическими клиньями, гидроклиньями [2], при помощи гидроксплиттеров [3], ориентированного флюидоразрыва [4], электрогидравлических установок [5] и др. Способ разрушения пород с помощью механических клиньев очень трудозатратный, низкопроизводительный. При использовании других указанных способов невзрывного разрушения необходимо применять дорогостоящие материалы и оборудование, также потребляется значительный объем энергии. Это в итоге приводит к значительному увеличению затрат. У способа разрушения при помощи невзрывчатых разрушающих составов, например НРС-1 (Россия), НРВ-80 (Украина), Bristar (Япония) и др., отсутствуют перечисленные выше недостатки, что позволяет ему быть достаточно конкурентоспособным.

В последнее время авторы статьи проводят теоретические, лабораторные и натурные исследования с целью выявления дополнительных областей, в которых будет целесообразно применение невзрывчатых разрушающих составов, например использование их для разрушения пород в условиях подземных горных выработок [6, 7]. Актуальность вопроса состоит в необходимости разрушения горных пород в выработках с исходящей струей воздуха, в условиях ограниченного рабочего пространства рядом с работающим производственным оборудованием, а также при разрушении пород, вмещающих выбросоопасные пласты угля и песчаников. Для перечисленных условий способ невзрывного разрушения при помощи невзрывчатых разрушающих составов позволяет не применять специальный режим безопасности ведения горных работ и не останавливать работы основного цикла, поскольку не происходит динамического воздействия на горные породы. Разрабатываемая технология невзрывного разрушения должна обеспечивать минимальное время разрушения горных пород и учитывать особенности работы невзрывчатых разрушающих составов в условиях подземных горных выработок при относительно высокой температуре пород, вмещающих шпур.

Цель исследований – установление возможности применения способа невзрывного разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок с учетом особенностей теплового режима.

При реализации способа невзрывного разрушения работы начинают с бурения шпуров для размещения невзрывчатого разрушающего состава, которое производят со стороны открытой поверхности объекта, как правило, вертикально вниз. Шпуры бурят рядами в плоскости предполагаемого раскола. Возможный диаметр шпуров – 20...50 мм, рекомендуемый – 40 мм. При отсутствии свободного пространства для бурения вертикальных шпуров их бурят под углом, максимально близким к вертикали. Пробуренные шпуры очищают от пыли и буровой мелочи продувкой.

После этого в пробуренные шпуры заливают приготовленный раствор невзрывчатого разрушающего состава на глубину, равную 0,7...0,9 длины шпура. В качестве герметизатора шпура и средства предварительного распора невзрывчатого разрушающего состава могут применять деревянные клинья.

Результаты исследований. Исследования проводили в два этапа. В качестве рабочего агента применяли модифицированный невзрывчатый разрушающий состав, содержащий безводный карбонат натрия 4 масс. %, сульфитно-дрожжевую барду 1 масс. %, натриевую соль продукта конденсации нафталинсульфоокислоты и формальдегида 1 масс. %, хлорид натрия 2 масс. %, полиоксихлорид алюминия 2 масс. %, оксид кальция 90 масс. %.

Расстояние между шпурами рассчитывали по формуле, определяющей длину трещин, которая получена с использованием энергетического критерия Гриффитса и обусловлена медленно возрастающей нагрузкой растягивающих напряжений внутри шпура под действием невзрывчатого разрушающего состава. Протяженность трещины зависит от диаметра шпура, модуля упругости невзрывчатого разрушающего состава и параметров горной породы $E_m, k_{Ic}, P(\tau^*)$

$$L_{mp} = \frac{P^2(\tau^*) r_0^2 E_m}{2(k_{Ic})^2 E_{HPC}}, \quad (1)$$

где $P(\tau^*)$ – напряжение, развиваемое невзрывчатым разрушающим составом внутри шпура, принимается равным давлению расширения через заданное время τ^* разрушения объекта [3], МПа;

2 – численный коэффициент преобразований энергетического критерия Гриффитса;

r_0^2 – радиус шпура, м;

E_m – модуль упругости разрушаемого материала, МПа;

E_{HPC} – модуль упругости НРС, МПа;

k_{Ic} – коэффициент интенсивности напряжений разрушаемого материала, МПа.

В условиях карьера, в котором ведется добыча гранита, произвели разрушение негабаритных блоков с целью проверки параметров способа и отработки технологии его реализации. Полезные ископаемые месторождения –

интрузивные кристаллические породы, представленные гранитоидами (гранит порфировидный, гранит щелочной, аплит розовый), среди которых встречаются дайки лампрофира.

Предел прочности при сжатии в водонасыщенном состоянии по восьми пробам составляет 528...984 кг/см², среднее значение – 797 кг/см². Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний гранитоидов

Показатель	Номер пробы							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Объемный вес, кг/м ³	2,9	2,6	2,85	2,69	43	2,6	3	2,72
Удельный вес, кг/м ³	2,9	2,66	2,89	2,74	29	2,64	2,04	2,78
Пористость, %	2,9	0,4	4,6	1,5	29	0,69	6,6	2,2
Водопоглощение, %	0,51	0,1	0,5	0,2	0,50	0,08	1,18	0,21
Сопrotивляемость удару на копре	51	50	168	58	–	–	–	–
Износ в барабане Деваля, %	–	–	–	–	45	2	6,1	4,18
Сохранность NO ₂ SO ₄ (потеря в весе, ‰)	–	–	–	–	42	0,08	3,6	0,71
Предел прочности при сжатии, кг/см ²	–	–	–	–	–	–	–	–
– в воздушно-сухом состоянии;	8	580	1098	881	43	580,8	1634,2	907,89
– в водонасыщенном состоянии;	8	528	984	797	43	508	1196,8	818,59
– после испытания на сохранность;	–	–	–	–	43	500,6	1278,4	818,59
– после 100 циклов замораживания;	4	526	862	704	–	–	–	–
– после 50 циклов замораживания	8	443	952	781	–	–	–	–
Коэффициент размягчения	8	0,88	0,98	0,94	43	0,7	1,13	0,91
Морозостойкость – количество циклов замораживания	12	50	100	Вы-держ.	–	–	–	–
Коэффициент морозостойкости	12	0,82	0,98	0,89	–	–	–	–

На первом этапе экспериментальных работ проверяли такие параметры, как количество шпуров, расстояние между ними, время разрушения негабарита.

Для определения этих параметров взяли несколько негабаритов.

Для первого опыта был взят блок размерами 950×650×900 мм (рис. 1), в котором были пробурены шпуры на расстоянии 0,3 м. Температура окружающей среды составляла 23...27 °С.



Рис. 1. Общий вид гранитного блока с расстоянием между шпурами 0,3 м:
а – до разрушения; б – после разрушения

Разрушение негабаритного блока произошло через шесть часов симметрично на две большие части по линии шпуров и две маленькие части поперек линии шпуров.

Во втором опыте был взят негабаритный блок размерами 1300×1000×550 мм. Расстояние между шпурами составляло 0,5 м.

Через восемь часов от блока начала откалываться часть, при этом трещина прошла по линии шпуров.



Рис. 2. Общий вид гранитного блока с расстоянием между шпурами 0,5 м:
а – до разрушения; б – после разрушения

Таким образом, проведенные на первом этапе эксперименты подтвердили техническую возможность невзрывного разрушения пород и правильность подхода к расчету параметров предлагаемого способа.

Дальнейшие исследования проводили в условиях подземных горных выработок.

Для условий выработки с исходящей струей воздуха шахты «Щегловская-Глубокая» были разработаны рекомендации по проведению подрывки прочных пород почвы способом невзрывного разрушения при помощи невзрывчатых разрушающих составов [6], поскольку разрушение прочного песчаника отбойными молотками очень трудозатратно и не всегда возможно, а пылегазовый режим ограничивает возможность проведения взрывного разрушения.

Исследования и приемочные испытания предлагаемых рекомендаций проводили в 3-м западном конвейерном штреке пласта k_8 шахты «Щегловская-Глубокая». Экспериментальные участки расположены на пикетах ПК38 и ПК42 и имеют следующие горно-геологические условия. На участках экспериментальных работ угольный пласт k_8 имеет сложное строение. Уголь черный, блестящий, хрупкий, с включениями линз пирита и колчедана. Прослой представлен слабым перемятым глинистым сланцем. Непосредственно в месте контакта с пластом залегает известняк мощностью 2,1...4,1 м темно-серого цвета с коричневым оттенком. Известняк массивный, плотный, кристаллический, с обломками фауны и флоры, варьируется от слаботрещиноватого до полного отсутствия трещин. Трещины выполнены кальцитом. Для известняка характерно удаление от пласта на 1,5 м или внедрение в пласт в виде «отеков», которые утоняют пласт до 0,2 м. Контакт с известняком ровный, волнистый, мелкобугристый. Ложная кровля состоит из слабослюдистого, глинистого, плотного, однородного, темно-серого сланца мощностью 0,1...1,5 м с послойными зеркалами скольжения. Сцепление с известняком отсутствует. Сланец весьма неустойчивый и обрушается вслед за выемкой угля. Почва пласта – песчаник серого цвета, кварцевополевошпатовый, мелкозернистый, слюдистый, трещиноватый, комковатого строения, крепостью 6...10 по шкале профессора М. М. Протодяконова.

На втором этапе предлагаемый способ разрушения испытали для разделки габаритов рельсового пути и при подрывке пород почвы, у которых были только две свободные плоскости и температура которых составляла 26 °С.

На ПК42 провели разделку габаритов рельсового пути, представленных трещиноватым мелкослоистым песчаником. В забое подрывки при нормальном залегании пород было пробурено четыре шпура длиной 0,6 м на расстоянии между ними 0,27 м и с углом наклона к горизонтали 80 град. Расстояние от устьев шпуров до свободной поверхности составляло 0,65 м. В шпуры на глубину 0,55 м заливали приготовленный раствор невзрывчатого разрушающего состава, после чего шпур герметизировали глиной и клиновым устройством. Через три часа после размещения невзрывчатого разрушающего состава в шпурах началось отслаивание и короженье песчаника с отжимом разрушенных пластин толщиной 0,7...3 см в сторону забоя подрывки. При этом между шпурами с невзрывчатым разрушающим составом образовалась

магистральная трещина (рис. 3). Через шесть часов после начала эксперимента разрушение пород прекратилось, массив был расслоен пластинками песчаника, разрушенными параллельно слоистости, и отжат в сторону забоя подрывки (рис. 4), затем стало возможным убрать вручную разрушенную породу.



Рис. 3. Магистральная трещина между шпурами с невзрывчатый разрушающим составом



Рис. 4. Общий вид разрушенной породы в забое подрывки при разделке габаритов рельсового пути

На ПК38 провели разрушение пород почвы, представленных трещиноватым массивным песчаником. В забое подрывки пробурили три шпура длиной 0,5 м на расстоянии 0,3 м и с углом наклона к горизонтали 30 град. Расстояние от устьев шпуров до свободной поверхности составило 0,4 м. Через два часа после размещения невзрывчатого разрушающего состава в шпурах откололся корж песчаника толщиной 0,25...0,30 м, который затем смещался в сторону открытой плоскости забоя подрывки. Через четыре часа после начала эксперимента

деформирование прекратилось. Отжатый блок породы был разрушен на три части. Ширина раскрытия трещин составила 0,7...1,2 см (рис. 5).



Рис. 5. Общий вид разрушенной породы в забое подрывки

Выводы. Проведенные исследования подтвердили работоспособность предложенного способа невзрывного разрушения горных пород в условиях подземных горных выработок в случаях, когда породы представлены объектами с двумя и тремя свободными поверхностями. Разрушение пород при помощи невзрывчатых разрушающих составов обеспечивается при параметрах, рассчитанных согласно методике, предложенной авторами. Время разрушения монолитных блоков составляет 4...8 ч, происходит раскол пород по магистральной трещине между шпурами. Трещиноватые мелкослоистые породы разрушаются за счет их отжима в направлении, перпендикулярном напластованию, и поочередного разрушения отжатых слоев и пластинок. Поэтому способ подрывки прочных пород почвы, основанный на ее невзрывном разрушении, может быть рекомендован для внедрения в выработках с породами почвы, имеющими прочность на одноосное сжатие более 60 МПа.

Список литературы / References

1. Блюменфельд, В. М. Рациональный способ добычи гранитовых блоков / В. М. Блюменфельд // Горный журнал. – 1996. – № 6. – С. 33 – 35.
Blumenfeld V. M. *Ratsionalnyy sposob dobychi granitnykh blokov* [Short-cut method of granite blocks winning]. *Gornyy zhurnal*, 1996, no. 6, pp. 33-35. (In Russian)
2. Чеченков, М. С. Разработка прочных грунтов / М. С. Чеченков. – Ленинград : Стройиздат, 1987. – 231 с.

Chechenkov M. S. *Razrabotka prochnykh gruntov* [Solid subsoil development]. Leningrad, Stroyizdat Publ., 1987. 231 p. (In Russian)

3. Сахно, И. Г. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих веществ при фиксированном сопротивлении их объемному расширению / И. Г. Сахно // Проблемы гірського тиску. – 2010. – № 18. – С. 135 – 149.

Sakhno I. G. *Laboratornye issledovaniya osobennostey raboty nevzryvchatykh razrushayushchikh veshchestv pri fiksirovannom soprotivlenii ikh obyomnomu rasshireniyu* [Laboratory-scale investigations of specifics of non-explosive destruction substances behavior under stationary resistance to their bulk expansion]. *Problemy girskoho tysku*, 2010, no. 18, pp. 135-149. (In Russian)

4. Клишин, В. И. Способы и технические средства невзрывного разрушения горных пород растягивающими усилиями / В. И. Клишин, Ю. М. Леконцев, А. В. Новик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2000. – № 10. – С. 70 – 72.

Klishin V. I., Lekontsev Yu. M., Novik A. V. *Sposoby i tekhnicheskie sredstva nevzryvnogo razrusheniya gornykh porod rastyagivayushchimi usiliyami* [Methods and technics for non-explosive destruction of rocks by tensile forces]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2000, no. 10, pp. 70-72. (In Russian)

5. Лебедев, Ю. А. Добыча гранитных блоков в ЮАР / Ю. А. Лебедев, А. К. Горьков, А. Б. Макаров // Горный журнал. – 1996. – № 6. – С. 43 – 44.

Lebedev Yu. A., Gorkov A. K., Makarov A. B. *Dобыча гранитных блоков в ЮАР* [Granite blocks winning in RSA]. *Gornyy zhurnal*, 1996, no. 6, pp. 43-44. (In Russian)

6. Сахно, И. Г. Проведение выработок вслед за лавой с помощью невзрывчатых разрушающих составов / И. Г. Сахно, О. К. Мороз // Miedzynarodowa Konferencja “XI SZKOLA GEOMECHANIKI 2013”, Materialy Naukowe (Gliwice – Ustron, Poland, 15–18 pazdernika 2013). – Gliwice, Ustron, 2013. – С. 1 – 10.

Sakhno I. G., Moroz O. K. *Provedenie vyrabotok vsled za lavoy s pomoshchyu nevzryvchatykh razrushayushchikh sostavov* [Mine workings installation following the face applying non-explosive destruction compositions]. “XI SZKOLA GEOMECHANIKI 2013” International Conference : collection of scientific papers. Gliwice – Ustron, Poland, 2013. 281 p. (In Russian)

7. Мороз, О. К. Опыт разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими составами / О. К. Мороз // Машиностроение и техносфера XXI века : сборник трудов XXIX международной научно-технической конференции в г. Севастополе 12–18 сентября 2022 г. – Донецк : ДонНТУ, 2022. – С. 211 – 215.

Moroz O. K. *Opyt razrusheniya gornykh porod nevzryvchatymi razrushayushchimi sostavami* [Experience with destruction of rocks by non-explosive compositions]. *Mashinostroyeniye i tekhnosfera XXI veka* : collection of scientific papers

of the 29th International scientific and technical conference in Sevastopol, September 12-18, 2022. Donetsk, DonNTU Press, 2022. 374 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 14.04.2023

Oleg Kuzmich Moroz, Cand. Sci. (Tech.), professor; e-mail: okmoroz@rambler.ru

Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education

“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 301-09-47

Tatyana Olegovna Moroz, head of department; e-mail: tatiana.moroz@rambler.ru

State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”

of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-36

INVESTIGATION OF MECHANISM OF ROCKS DESTRUCTION BY NON-EXPLOSIVE DEMOLITION COMPOSITIONS AS A METHOD OF IMPROVEMENT OF THE SAFETY OF UNDERGROUND MINING WORKS

Purpose. To verify a possibility of applying a non-explosive method for rocks destruction in conditions of underground mine workings considering the specifics of thermal environment in order to improve the safety of underground mining works.

Methods. Experimental investigations of non-explosive method of rocks destruction in conditions of strip-pit and in the mine workings; determination of parameters of the proposed method.

Results. The results of the investigation on the mechanism of non-explosive destruction of rocks have been presented along with the experience of testing the non-explosive destruction compositions in the conditions of surface mining operations for destructing oversize granite blocks and in the underground mine workings during ripping the bedrock consisted of solid sandstone.

Scientific novelty. The non-hazardous method of rocks destruction has been proposed for the following work settings: mine workings with return ventilation stream, constricted work space within the vicinity of operating equipment, destruction of rocks consisted of explosive coal and sandstones seams. The method no longer requires halting the main cycle operations and has zero hazardous dynamics impact on the rock mass enveloping the mine working.

Practical value. The proposed method of solid bedrocks ripping based on its non-explosive destruction may be recommended for implementation in the underground mine workings containing the bedrocks with uniaxial compression strength of 60 MPa.

Keywords: *non-explosive method of rocks destruction; underground mine workings; rocks; non-explosive destruction compositions; bedrock ripping.*

УДК 622.867.324

Владимир Михайлович Медгаус, нач. отд.; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru;

Руслан Сергеевич Плетенецкий, ст. науч. сотр.; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;

Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: lzborschik@yandex.ru;

Виктор Иванович Францев, вед. инж.; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-45

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ШАХТНОГО САМОСПАСАТЕЛЯ ШСС-1П

Цель. Установить изменение параметров серийно выпускаемого шахтного самоспасателя ШСС-1П, подлежащих обязательной проверке, при проведении периодических и сертификационных испытаний для технического надзора за качеством выпускаемой продукции.

Методы. Экспериментальные и аналитические методы исследований шахтных изолирующих дыхательных аппаратов.

Результаты. Проведены экспериментальные исследования шахтных самоспасателей ШСС-1П на динамической установке «искусственные легкие». Положительные результаты испытаний являются основанием для проведения сертификации самоспасателей ШСС-1П (для декларирования соответствия техническим условиям на изготовление).

Научная новизна. Исследованы изменения параметров изготовленных самоспасателей ШСС-1П для сбора массива статистических данных.

Практическая значимость. Проведенные исследования позволяют контролировать качество изготовления шахтного самоспасателя ШСС-1П.

Ключевые слова: шахтный самоспасатель; дыхательный аппарат; химически связанный кислород; надпероксид калия; непригодная для дыхания среда; время защитного действия; сопротивление дыханию; сертификация.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Важность вопроса охраны труда в угольной отрасли не подлежит сомнению. Специфика охраны труда заключается в проведении санитарно-гигиенических мероприятий (предотвращающих профессиональные заболевания), соблюдении правил безопасной эксплуатации оборудования (для предотвращения травмирования), борьбе с авариями в шахтах. Согласно методическим указаниям Госкомтехнадзора России аварии – это разрушение подземных выработок различного назначения, трубопроводов, технологических коммуникаций, зданий, сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрывы и (или) выбросы опасных веществ, пожары, обрушения горной массы и другие нарушения жизненного цикла производственных процессов, вызвавшие приостановку опасного производственного объекта.

В результате произошедшей аварии часто изменяется состав рудничного воздуха, вплоть до полной непригодности его для дыхания. Поэтому каждый работник, занятый на подземных работах, должен иметь при себе и уметь применять изолирующее средство защиты органов дыхания – самоспасатель. На угольных шахтах ДНР в случае возникновения аварии применяют в основном изолирующие самоспасатели с химически связанным кислородом ШСС-1П (рис. 1), время защитного действия которых 50...60 мин.



Рис. 1. Изолирующий самоспасатель ШСС-1П

Самоспасатели, по согласованию с заводом-изготовителем, можно применять и в других отраслях промышленности, где необходима индивидуальная защита органов дыхания. Одно из основных условий сохранения жизни работника в угольной шахте в непригодной для дыхания среде – своевременное и правильное применение шахтного самоспасателя изолирующего типа (ШСС-1П). Поэтому аппарат выпускают готовым к немедленному применению в аварийных условиях в газоопасных шахтах любой категории, сверхкатегорийных, шахтах, опасных по внезапным выбросам угля и газа, шахтах с повышенной агрессивностью производственной среды; он дает возможность застигнутому аварией человеку за период до 30 с изолировать органы дыхания от внешней среды и выйти из нее или дождаться помощи.

Технический регламент Таможенного союза 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» устанавливает обязательные для исполнения требования к средствам индивидуальной защиты органов дыхания (далее – СИЗОД), предназначенным для охраны труда персонала опасных производственных объектов (в том числе дыхательным аппаратам, СИЗОД со сжатым воздухом, СИЗОД со сжатым кислородом, неавтономным (шланговым) СИЗОД) [1].

Кроме обязательных для исполнения требований Технический регламент 019/2011 содержит требования к формам и процедурам подтверждения соответствия средств индивидуальной защиты требованиям указанного технического регламента. Формами подтверждения соответствия являются обязательная сертификация и декларирование о соответствии. Система стандартов безопасности труда регулируется соответствующей нормативной базой, основу которой составляют национальные стандарты, регламентирующие весь «жизненный» цикл средств индивидуальной защиты, то есть их разработку, производство, использование производственным персоналом опасных объектов, утилизацию и уничтожение.

Принцип действия изолирующего средства индивидуальной защиты с химически связанным кислородом основан на выделении при взаимодействии с выдыхаемыми человеком диоксидом углерода и парами воды кислорода в количестве, достаточном для дыхания. В самоспасателе реализована замкнутая система дыхания. Шахтный самоспасатель ШСС-1П является усовершенствованной модификацией ШСС-1У – самоспасателя в корпусе из углеродистой стали. В конструкцию самоспасателя ШСС-1П введены новые элементы, позволяющие при сохранении тех же габаритов и массы базовой модели значительно улучшить эксплуатационные характеристики: разработан и применен корпус аппарата из пластмассы, который более стоек к воздействию агрессивных шахтных вод, обладает антистатическими свойствами (не более 10^9 Ом) и ударопрочностью. Самоспасатель ШСС-1П снабжен стяжными лентами и замком оригинальной конструкции, облегчающими вскрытие аппарата, на футляр нанесены светоотражающие наклейки и пиктограммы, объясняющие порядок включения в аппарат.

ШСС-1П по показателям устойчивости к механическим воздействиям, воспламеняемости и поверхностного электрического сопротивления соответствует всем нормам и допущен к использованию в шахтах и рудниках различных категорий газоопасности. Среди аппаратов подобного типа он получил наибольшее распространение в мире в шахтах, опасных по внезапным выбросам.

Самоспасатель ШСС-1П – дыхательный аппарат с маятниковой схемой движения газовой дыхательной смеси и улучшенными аэродинамическими показателями параметров дыхания. Маятниковая схема дыхания предусматривает прохождение газовой дыхательной смеси потока через кислородсодержащий продукт два раза, позволяет улучшить условия регенерации. Условия дыхания в самоспасателе улучшаются также с помощью применяемого в конструкции теплообменника, который удерживает до 80 % водяных паров на фазе выдоха в самоспасатель (оставшаяся часть водяных паров поступает к регенеративному продукту). При вдохе из самоспасателя горячий и сухой воздух, обогащенный кислородом, увлажняется за счет

испарения влаги с поверхности теплообменника, и температура воздуха снижается на 5...8 °С. Это происходит из-за затрат теплоты на испарение влаги. Снижение температуры выдыхаемого воздуха способствует увеличению продолжительности активного периода работы самоспасателя на 8...10 мин.

Самоспасатель ШСС-1П отличается надежностью действия, простотой обслуживания при эксплуатации, улучшенными условиями дыхания, экономным расходом кислорода в зависимости от выполняемой нагрузки. Критериями годности самоспасателя на эксплуатируемых его предприятиях являются герметичность корпуса и назначенный срок службы (5 лет).

Для подтверждения соответствия выпускаемых производителем самоспасателей требованиям нормативной документации (таблица) проводят их сертификационные и периодические испытания (исследования), которые должны либо подтвердить соответствие, либо выявить ухудшение качества и сообщить об этом.

Таблица

Технические характеристики самоспасателя ШСС-1П

Наименование параметра	Данные руководства по эксплуатации С14Д2.00.000 РЭ	Данные ГОСТ 12.4.292-2015
Время защитного действия (ВЗД), мин, не менее:		
– номинальное, при испытании на стенде;	50	30...60
– при легочной вентиляции 10 дм ³ /мин (нахождение в покое в ожидании помощи)	150	150
Температура вдыхаемой газовой дыхательной смеси (ГДС) на протяжении номинального ВЗД, °С, не более	55	55
Объемная доля диоксида углерода во вдыхаемой ГДС в течение номинального ВЗД, %, не более	3	3
Масса, кг, не более	3,0	3,5

Анализ последних исследований и публикаций. С появлением Таможенного союза (Евразийского экономического союза) был разработан технический регламент ТР ТС 019/2011 «О безопасности средств индивидуальной защиты» с перечнем нормативных документов (стандартов), соблюдение которых обуславливает соответствие продукции требованиям данного документа [1].

В апреле 2011 г. было утверждено Положение о порядке применения типовых схем оценки (подтверждения) соответствия в технических регламентах Таможенного союза, в п. 22 которого перечислен ряд процедур,

которые необходимо выполнить. Из девяти приведенных в документе схем сертификации СИЗОД наиболее распространены две схемы (рис. 2).



Рис. 2. Наиболее распространенные схемы сертификации средств индивидуальной защиты [2]

Орган по сертификации Российской Федерации должен зарегистрировать поданную заявку в Федеральной государственной информационной системе (ФГИС) Росаккредитации.

Процедуры проведения испытаний продукции (в том числе сертификационных) имеют в Донецкой Народной Республике свои особенности. Указом Главы Донецкой Народной Республики от 13 марта

2017 г. № 55 «О республиканской системе аккредитации» функции по выработке государственной политики и нормативно-правовому регулированию в сфере аккредитации, функции по формированию республиканской системы аккредитации, а также полномочия Республиканского органа по аккредитации возложены на Министерство экономического развития Донецкой Народной Республики. Законом Донецкой Народной Республики № 62-І НС «Об аккредитации в республиканской системе аккредитации» установлено, что аккредитация – это подтверждение республиканским органом по аккредитации соответствия юридического лица или физического лица – предпринимателя критериям аккредитации, являющееся официальным свидетельством компетентности юридического лица или физического лица – предпринимателя осуществлять деятельность в определенной области аккредитации.

В 2018 г. в НИИ «Респиратор» был создан Испытательный центр аварийно-спасательного оборудования и пожарной техники, веществ и материалов, получивший аккредитацию в Минэкономразвития.

В соответствии с частью 2 статьи 4 Федерального конституционного закона от 4 октября 2022 г. № 5-ФКЗ «О принятии в Российскую Федерацию Донецкой Народной Республики и образовании в составе Российской Федерации нового субъекта – Донецкой Народной Республики» нормативные правовые акты Донецкой Народной Республики действуют на территории Донецкой Народной Республики до окончания переходного периода или до принятия соответствующего нормативного правового акта Российской Федерации и (или) нормативного правового акта Донецкой Народной Республики.

За рубежом также имеются структуры, аналогичные отечественным органам сертификации, которые отвечают за подтверждение соответствия выпускаемой продукции. В США это Национальный институт охраны труда (National Institute for Occupational Safety and Health), который проводит сертификацию самоспасателей для профилактики продажи их низкого качества. Это единственная организация, сертифицирующая СИЗОД в США.

Заявка на сертификацию СИЗОД рассматривается Национальным институтом охраны труда (НИОТ) вместе с планом контроля качества продукции. План должен обеспечивать постоянное качество самоспасателей, испытываемых НИОТ и поступающих в продажу. НИОТ может проверить выполнение плана (посещение предприятия, опрос сотрудников, проверка оборудования и др.) и аннулировать сертификат при его нарушениях. Для послесертификационного контроля производитель предоставляет НИОТ самоспасатели (до 100 шт. ежегодно). НИОТ заменяет их на купленные потребителями и проводит испытания изделий, находившихся в местах хранения или носившихся шахтерами. Проверка выявила нарушения (5 случаев на 500 шт.) в подаче кислорода стартером у самоспасателя CSE SR-100 (позже снят с эксплуатации).

Сертификация самоспасателей и других СИЗОД в РФ [3] не включает проверки после сертификации, проводится разными организациями. Следует отметить, что многие реально существующие типы СИЗ (неавтономные шланговые дыхательные аппараты, фильтрующие СИЗОД с принудительной вентиляцией и др.) в регламентах даже не упоминаются, и сами требования содержат неточности [4, 5].

Согласно данным исследований, проведенных ФГУП ВНИИЖГ (Москва), по прошествии времени после обучения навыки правильного надевания самоспасателей частично утрачиваются. Через три месяца после обучения доля людей, не делающих ошибки, уменьшается вдвое. На разных шахтах количество ошибок могло превышать 50 % случаев применения (например, не надели носовой зажим – 25 %, не включили пусковое устройство – 10 %) [3].

Это указывает на необходимость уделять внимание обучению правилам пользования самоспасателем наряду с постоянным контролем качества выпускаемой продукции.

Цель исследования – установить изменение параметров серийно выпускаемого шахтного самоспасателя ШСС-1П, подлежащих обязательной проверке, при проведении периодических и сертификационных испытаний для технического надзора за качеством выпускаемой продукции.

Результаты исследований. Общепринятый метод проверки качества СИЗОД – динамические испытания на установке «искусственные легкие». Преимущество таких испытаний – строго определенный режим работы, устанавливаемый оператором-испытателем, объективность и воспроизводимость результатов. В связи с этим согласно установленной процедуре по заявке органа по сертификации ДНР (ГУП «Донецкстандартметрология») Испытательный центр НИИ «Респиратор» регулярно проводит динамические испытания самоспасателей ШСС-1П с целью их сертификации и контрольные испытания с целью технического надзора за качеством выпускаемой продукции.

Действующими техническими условиями для проведения испытаний определен режим легочной вентиляции и подачи диоксида углерода, соответствующий номинальному режиму по ГОСТ 12.4.292-2015. Этот режим достаточно часто используется для технического контроля качества шахтных самоспасателей как наиболее соответствующий условиям дыхания горнорабочих при выходе в самоспасателе из аварийного участка.

Номинальное время защитного действия (номинальное ВЗД) определяют как время защитного действия самоспасателя, которое установлено для конкретного типа самоспасателя при испытании его на установке «искусственные легкие» в номинальном режиме и относительно которого устанавливаются допустимые значения фактического ВЗД при различных условиях. Номинальный режим – режим испытаний на установке «искусственные легкие» с легочной вентиляцией 35 дм³/мин при температуре окружающей среды (20 ± 5) °С.

Для проведения испытаний заводом-изготовителем были представлены самоспасатели ШСС-1П, изготовленные в 2020–2022 гг. и не находившиеся в эксплуатации. В процессе испытаний из дыхательного мешка самоспасателя непрерывно отбирали пробы газовой дыхательной смеси для измерения содержания кислорода и диоксида углерода, а также измеряли сопротивление дыханию и температуру вдыхаемого из самоспасателя воздуха. Общее время испытания составило 70 мин – до достижения объемной концентрации диоксида углерода в дыхательном мешке 2,0...2,3 % (согласно ГОСТ 12.4.292-2015 концентрация диоксида углерода должна составлять не более 3,0 %). Зависимости параметров испытания самоспасателей от времени приведены на рисунках 3 и 4.

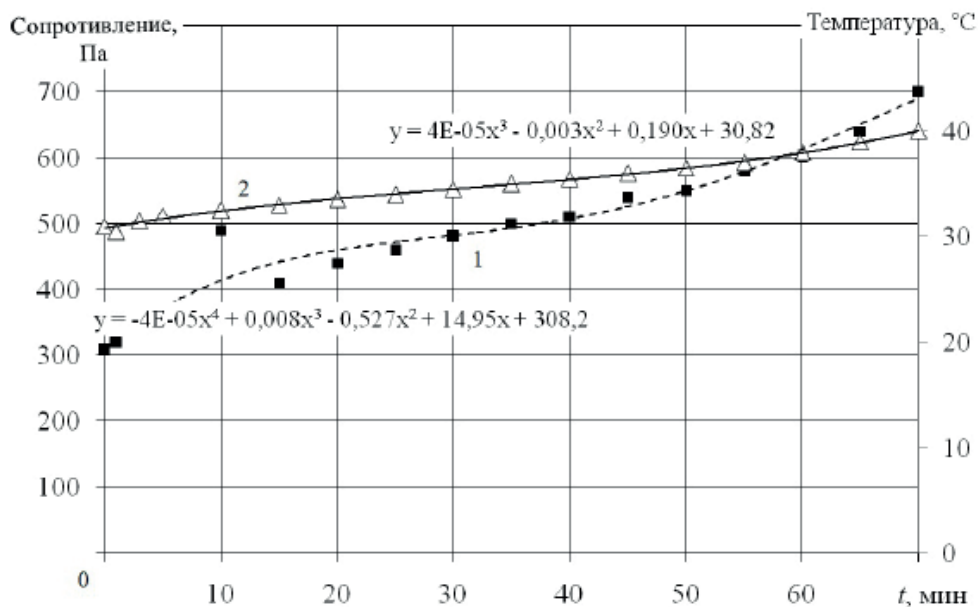


Рис. 3. Изменение сопротивления дыханию и температуры вдыхаемого воздуха в течение времени защитного действия изолирующего самоспасателя ШСС-1П: 1 – сопротивление дыханию; 2 – температура вдыхаемого воздуха

Сопротивление дыханию постепенно увеличивалось по мере отработки регенеративного продукта. К 40-й мин работы происходил сильный разогрев регенеративного продукта в регенеративном патроне самоспасателя, что приводило к некоторому оплавлению гранул продукта, их кристаллизации и блокировке части неотработанного кислородсодержащего продукта от взаимодействия с газовой дыхательной смесью.

Объемная концентрация кислорода в дыхательном мешке также увеличивалась по мере развития химической реакции в патроне самоспасателя до 90...92 %. В конце испытания количество оставшегося регенеративного продукта уже не обеспечивало достаточную регенерацию газовой дыхательной смеси, концентрация кислорода снижалась, при этом наблюдалось слабое

наполнение дыхательного мешка и он был близок к состоянию опустошения (схлопывания).

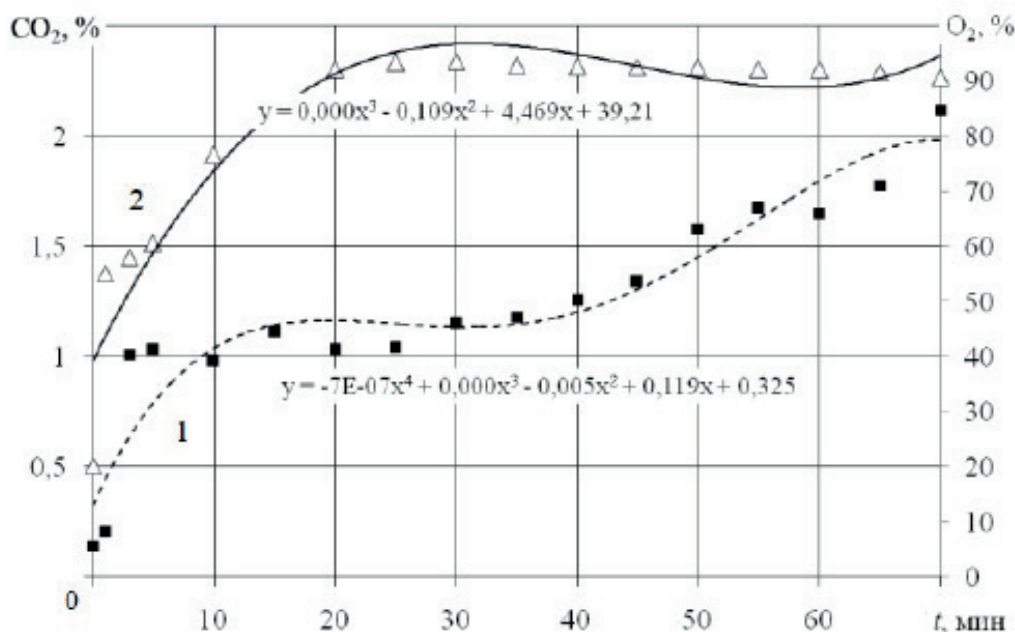


Рис. 4. Изменение содержания кислорода и диоксида углерода во вдыхаемом воздухе в течение времени защитного действия изолирующего самоспасателя ШСС-1П:
1 – содержание диоксида углерода; 2 – содержание кислорода

Концентрация диоксида углерода постепенно и относительно равномерно возрастала в течение 50 мин. Скачкообразный рост концентрации наблюдался в конце испытания, поскольку в отработанном регенеративном продукте выдыхаемый диоксид углерода не связывался в достаточной степени продуктами гидролиза надпероксида калия.

В результате испытаний самоспасателя на динамической установке «искусственные легкие» определено фактическое время защитного действия самоспасателя ШСС-1П – 70 мин, оно больше, чем заявленное номинальное время защитного действия (50...60 мин).

Выводы и перспективы дальнейших исследований.

Все представленные на испытания самоспасатели ШСС-1П подтвердили соответствие требованиям технических условий на серийное производство, что обуславливает положительную оценку качества изготовления самоспасателей ШСС-1П и оптимальную конструкцию дыхательного аппарата. НИИ «Респиратор» как автор проекта постоянно осуществляет авторский надзор за состоянием технической документации, промышленной эксплуатацией самоспасателя, проводит научное сопровождение изделия при совершенствовании конструкции.

Список литературы / References

1. Технический регламент о безопасности средств индивидуальной защиты // Безопасность труда в промышленности. – 2010. – № 6. – С. 61 – 85.

Tekhnicheskiy reglament o bezopasnosti sredstv individualnoy zashchity [Technical regulations on safety of personal protective equipment]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2010, no. 6, pp. 61-85. (In Russian)

2. Фролов, С. В. Сертификация, вызывающая доверие / С. В. Фролов // Контроль качества продукции. – 2018. – № 7. – С. 26 – 29.

Frolov S. V. *Sertifikatsiya, vyzyvayushchaya doverie* [Certification that can be trusted]. *Kontrol kachestva produktsii*, 2018, no. 7, pp. 26-29. (In Russian)

3. Капцов, В. А. О применении автономных изолирующих респираторов / В. А. Капцов, А. В. Чиркин // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 3. – С. 46 – 50.

Kaptsov V. A., Chirkin A. V. *O primeneni avtonomnykh izoliruyushchikh respiratorov* [On application of self-contained respiratory protective devices]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*, 2018, no. 3, pp. 46-50. (In Russian)

4. Лянг, А. В. Техническое регулирование в области средств индивидуальной защиты / А. В. Лянг, Г. А. Кутумина, И. Г. Малик // Стандарты и качество. – 2011. – № 6. – С. 38 – 40.

Lyang A. V., Kutumina G. A., Malik I. G. *Tekhnicheskoe regulirovanie v oblasti sredstv individualnoy zashchity* [Technical regulations in the field of personal protective devices]. *Standarty i kachestvo*, 2011, no. 6, pp. 38-40. (In Russian)

5. Особенности внедрения в практику работы учреждений Роспотребнадзора Технического регламента Таможенного союза «О безопасности средств индивидуальной защиты» 019/2011 / Ю. И. Степкин, Р. Ю. Храпов, Г. П. Дубова, Ю. В. Сушик // Здоровье населения и среда обитания – ЗНиСО. – 2012. – № 12(237). – С. 4 – 5.

Stepkin Yu. I., Khrapov R. Yu., Dubova G. P., Sushik Yu. V. *Osobennosti vnedreniya v praktiku raboty uchrezhdeniy Rospotrebnadzora Tekhnicheskogo reglamenta Tamozhennogo soyuza "O bezopasnosti sredstv individualnoy zashchity" 019/2011* [Specifics of implementation of The Customs Union Technical Regulations "On safety of personal protective equipment" into the business practices of institutions]. *Zdorovye naseleniya i sreda obitaniya – ZniSO*, 2012, no. 12(237), pp. 4-5. (In Russian)

*Vladimir Mikhaylovich Medgaus, head of department; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru;
Ruslan Sergeevich Pletenetskiy, senior scientific associate; e-mail: zoloto-rusland@yandex.ru;
Lyubov Alekseyevna Zborshchik, senior scientific associate; e-mail: lzborschik@yandex.ru;
Viktor Ivanovich Frantsev, principle engineer; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”
238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-45*

INVESTIGATION OF THE III CC-1II MINE SELF-RESCUER PARAMETERS

Purpose. To fixate changes in parameters of the commercial III CC-1II mine self-rescuer subjected to mandatory check during carrying-out of regularly and certification testing for the technological supervision of quality control.

Methods. Experimental and analytical methods of investigations of mine self-contained breathing apparatuses.

Results. The experimental investigations of the III CC-1II mine self-rescuers were conducted on the iron lungs dynamic installation. The positive results of the tests qualify for certification of the III CC-1II self-rescuers (i.e. certification of conformance to the manufacturing specifications).

Scientific novelty. The changes in parameters of the produced III CC-1II self-rescuers have been investigated in order to collect statistic data.

Practical value. The conducted investigations allow monitoring of the III CC-1II mine self-rescuer production quality.

Keywords: *mine self-rescuer; breathing apparatus; chemical oxygen; potassium superoxide; irrespirable environment; protective power time; respiratory resistance; certification.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 614.841.245

Илья Адольфович Бершадский, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры;

e-mail: ibersh164@yandex.ru;

Никита Александрович Савинов, аспирант; e-mail: excreman97@gmail.com

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: (+7 949) 414-28-12

Александр Юрьевич Гладков, канд. техн. наук, зав. лабораторией; e-mail: gladkov5555@rambler.ru

Государственное учреждение «Макеевский научно-исследовательский институт

по безопасности работ в горной промышленности»

286132, Макеевка, ул. Лихачева, 60. Тел.: (+7 949) 420-16-97

Александр Петрович Ковалев, д-р техн. наук, профессор, науч. сотр.; e-mail: saponenko60@mail.ru

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-79-07

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЗАЩИТЫ КЛЕММНОГО СОЕДИНЕНИЯ СЕТЕВОГО ФИЛЬТРА

Цель. Установление зависимости температуры перегрева контактов сетевого фильтра от конструктивных и электрических параметров для обоснования пожаробезопасных свойств его защиты.

Методы. Теоретические основы электротехники и электроники, математического моделирования, методы лабораторных испытаний для получения зависимостей температуры нагревания проводника в месте контактного соединения от времени, переходного сопротивления и силы тока.

Результаты. Предложена математическая модель нагревания проводников в контактном соединении сетевого фильтра, учитывающая его переходное сопротивление, силу тока нагрузки, размеры теплоподводящих элементов и коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника. Установлена зависимость коэффициента теплоотдачи с поверхности проводника сетевого фильтра от рассеиваемой мощности на нем.

Научная новизна. Впервые предложен удобный расчетно-экспериментальный метод определения установившейся температуры нагревания контактных пластин сетевого фильтра при различных сочетаниях тока нагрузки и переходного сопротивления контактного соединения.

Практическое значение. Обоснована критическая температура срабатывания защиты сетевого фильтра от перегрева контактного соединения и разработана его электрическая схема, исключающая возгорания при номинальных токах.

Ключевые слова: *сетевой фильтр; контактная пластина; расчетный метод; коэффициент теплоотдачи; установившаяся температура; рассеиваемая мощность; сопротивление контакта; термореле.*

Постановка проблемы. Для обеспечения пожарной безопасности в низковольтных электроустановках жилых и общественных зданий существенное

значение имеют отказы, связанные с раскаленными соединениями и искрениями, которые обычно возникают из-за перегрева некачественных электрических соединений, характеризующихся высоким электрическим сопротивлением [1].

Согласно статистике, в последние годы пожары в зданиях, вызванные электрическими факторами, составляют примерно от 30 до 50 % от общего числа, и их доля продолжает расти [2]. Плохой электрический контакт – это неисправность в низковольтной электросети, которая не обнаруживается обычными защитными устройствами [3]. Международный фонд электробезопасности (ESFI) приводит данные, показывающие, что сетевые фильтры – распространенная причина возгораний.

Известные способы защиты сетевого фильтра от токов перегрузки с помощью термобиметалла и от короткого замыкания (далее – КЗ) плавким предохранителем не обеспечивают защиту от возгораний при токах, меньших допустимого рабочего, вызванных перегревом плохого электрического контакта по причине искрения или монотонного изменения его переходного сопротивления.

Таким образом, два вида отказа – перегрев плохого электрического контакта и регулярная электрическая дуга – критические с точки зрения возникновения пожара, так как ни один классический защитный компонент не обнаруживает их.

Анализ последних исследований и публикаций. Разработке способов противодействия указанным выше пожароопасным проявлениям электрического искрения и монотонного повышения сопротивления контактов электроустановок посвящен ряд работ [4–6]. Каждый из указанных способов имеет ряд недостатков, ограничивающих их внедрение в сетевых фильтрах.

Один из эффективных принципов обнаружения «горячих» точек – установка термодатчиков для замера температуры нагревания медных пластин разборного соединения сетевого фильтра.

Определение уставок температуры срабатывания и места расположения датчиков термореле тесно связано с динамикой роста температуры нагревания проводника в месте контактного соединения от времени.

Таким образом, **цель работы** – установление зависимости температуры перегрева контактов сетевого фильтра от конструктивных и электрических параметров для обоснования пожаробезопасных свойств его защиты.

Результаты исследований. Ряд сетевых фильтров снабжен термобиметаллической защитой от перегрузок, плавким предохранителем от КЗ и защитой от перегрева внутри корпуса в виде термопредохранителя. Последняя срабатывает, когда внутри уже будет недопустимое перегревание, то есть не будет обеспечиваться диагностика нагревания.

Предлагается добавить в сетевой фильтр новую защиту от перегрева плохого электрического контакта, сохранив существующие виды защит. Технологически это возможно, так как имеются свободные технологические полости в корпусе.

Место установки датчика и уставка температуры его срабатывания определяют путем экспериментов и математического моделирования нагревания пластин. Это актуально для отстройки от тока нормального режима при варьировании $R_{\text{п}} > 18 \dots 20$ мОм (определено экспериментально).

С целью определения уставок температуры срабатывания датчиков термореле необходимо провести математическое моделирование и получить обоснованное решение по определению зависимости изменения температуры нагревания проводника от времени в месте контактного соединения.

Рассмотрим данную задачу на примере 5-розеточного сетевого фильтра с номинальным током 10 А, мощностью 2,2 кВт. Основные размеры контактных пластин сетевого фильтра, мм (рис. 1), использованы при вычислении коэффициента теплоотдачи.

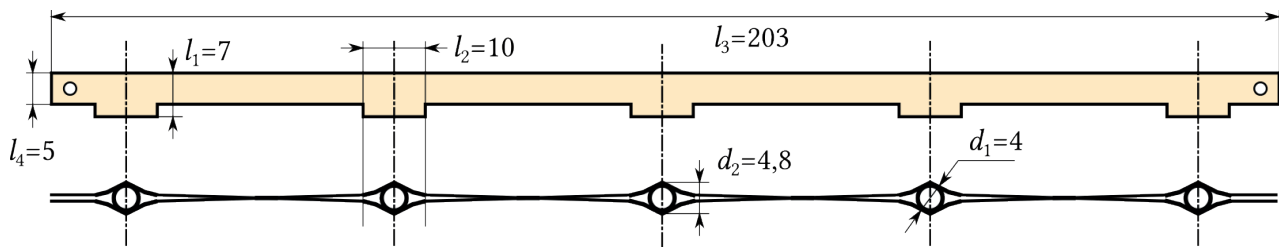


Рис. 1. Сборочный чертеж контактной пластины сетевого фильтра

Моделирование выполняется для определения параметров допустимого нагревания контактного соединения в зависимости от его сопротивления, тока нагрузки и размеров теплоподводящих элементов сетевого фильтра.

За время τ , с, в проводнике выделяется теплота

$$Q = I^2 R_{\text{конт}} \tau, \quad (1)$$

где Q — количество выделяемой теплоты в проводнике, Дж;

I — длительно допустимый ток, А;

$R_{\text{конт}}$ — переходное сопротивление контактного соединения, Ом.

Баланс выделяемой теплоты Q распределяется на нагревание проводника и отдачу теплоты в окружающую среду с поверхности контактного соединения

$$Q = Q_{\text{нагр}} + Q_{\text{рас}}, \quad (2)$$

где $Q_{\text{нагр}}$ — количество теплоты, затраченной на нагревание проводника в месте контактного соединения: $Q_{\text{нагр}} = c m d T$, Дж.

c — теплоемкость материала проводника, Дж/(кг·К);

m — масса проводника, кг;

$Q_{\text{рас}}$ — количество теплоты, затрачиваемой в контактном соединении на излучение с поверхности проводника, конвекцию и теплопроводность: $Q_{\text{рас}} = \alpha S T_s d \tau$, Дж.

α – коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника, Вт/(м²·К);

S – площадь теплоотдающей поверхности проводника, м²;

T_s – температура поверхности проводника, К.

Сложнее определяется коэффициент теплоотдачи α с поверхности проводника. Следует отметить, что коэффициент теплоотдачи α зависит от большого количества разных факторов и растет с увеличением тока нагрузки, причем этот рост имеет нелинейный характер в зависимости от количества выделяемой мощности P .

Ставилась задача сопоставить расчетный метод с результатами эксперимента по определению температуры нагревания контактных пластин сетевого фильтра и скорректировать коэффициент теплоотдачи α так, чтобы экспериментальные кривые нагревания во времени совпадали с теоретическими.

С учетом уравнений (1), (2) получим

$$I^2 R_{\text{конт}} d\tau = cm dT_s + \alpha S T_s d\tau. \quad (3)$$

Установившаяся температура нагревания проводника в контактном узле $T_{\text{уст}}$ получена из уравнения (3) с учетом того, что в этом режиме $cmdT_s = 0$:

$$T_{\text{уст}} = \frac{I^2 R_{\text{конт}}}{\alpha S}. \quad (4)$$

Первоначально, учитывая сложность зависимости $\alpha = \alpha(T_s)$, решение уравнения (3) получим при допущении $\alpha = \text{const}$. Интегрируя уравнение (3), находим зависимость температуры нагревания проводника $T_{\text{нагр}}$ от времени в месте контактного соединения

$$T_{\text{нагр}}(\tau_{\text{нагр}}, R_{\text{конт}}, l) = \frac{I^2 R_{\text{конт}}}{\alpha S} - \left(\frac{I^2 R_{\text{конт}}}{\alpha S} - T_0 \right) e^{-\frac{\tau_{\text{нагр}} \alpha S}{cm}}. \quad (5)$$

С учетом уравнения (4) находим температуру нагревания проводника

$$T_{\text{нагр}} = T_{\text{уст}} - (T_{\text{уст}} - T_0) e^{-\frac{\tau_{\text{нагр}} \alpha S}{cm}}, \quad (6)$$

где T_0 – начальная температура нагревания проводника в месте контактного соединения, К;

$\tau_{\text{нагр}}$ – время нагревания, с.

Коэффициент теплоотдачи α наиболее точно можно определить путем экспериментального исследования нагревания контактной пластины сетевого фильтра, поместив термопару Pt100 возле точки локального нагревания контактного соединения – места установки вилки электроприемника.

Требуемое сопротивление $R_{\text{конт}}$ контактного соединения «вилка – пластины» можно обеспечить за счет медных гильз, предварительно окисленных бытовым аммиаком.

Рассмотрим особенности расчета на примере токовой нагрузки $I_{\text{нагр}} = 3 \text{ А}$. Сопротивление контактного соединения принимаем $R_{\text{конт}} = 0,33 \text{ Ом}$, $T_0 = 25,3 \text{ °C}$. Путем параметрического анализа определены коэффициент теплоотдачи $\alpha = 11,57 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ и зависимость $T_{\text{нагр}}(\tau_{\text{нагр}})$ (рис. 2), согласно уравнению (6) $T_{\text{уст}} = 107,4 \text{ °C}$ (среднеквадратичное отклонение $R = 0,929 \text{ °C}$).

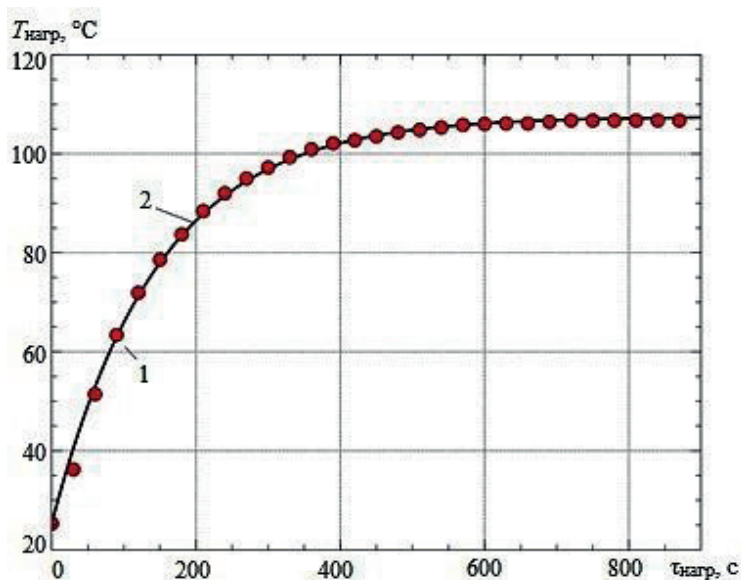


Рис. 2. Зависимость температуры нагрева проводника в месте контактного соединения от времени, полученная: 1 – экспериментально; 2 – теоретически

Аналогично, при варьировании $I_{\text{нагр}} = 2...16 \text{ А}$, $R_{\text{конт}} = 30...330 \text{ мОм}$ определены значения $T_{\text{уст}}(P, R_{\text{конт}})$ и уравнение регрессии $\alpha = 20,41\sqrt{0,098P + 0,1159} - 1,665, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Итоговым результатом расчетов по данной методике стала характеристика

$$T_{\text{уст}}(P) = 0,0421P^3 - 1,6795P^2 + 29,949P + 32,936. \quad (7)$$

Она позволяет рассчитывать $T_{\text{уст}}$ при любых сочетаниях $I_{\text{нагр}}$ и $R_{\text{конт}}$ для указанного типа сетевого фильтра (среднеквадратичное отклонение $R = 0,825 \text{ °C}$) (рис. 3).

Согласно ГОСТ Р 51539-99 (МЭК 61242-95). Группа Е71. «Государственный стандарт Российской Федерации. Удлинитель бытового и аналогичного. Назначения на кабельных катушках. Общие требования и методы испытаний» в нормальном режиме в сетевых фильтрах, имеющих соединения между неподвижными и подвижными частями, должно выполняться $R_{\text{конт}} \leq 0,05 \text{ Ом}$.

В проведенных нами экспериментах $R_{\text{конт}}$ не превышало 0,02 Ом, тогда при $I_{\text{нагр}} = 10$ А из уравнения (7) получим $T_{\text{уст}} = 86,5$ °С.

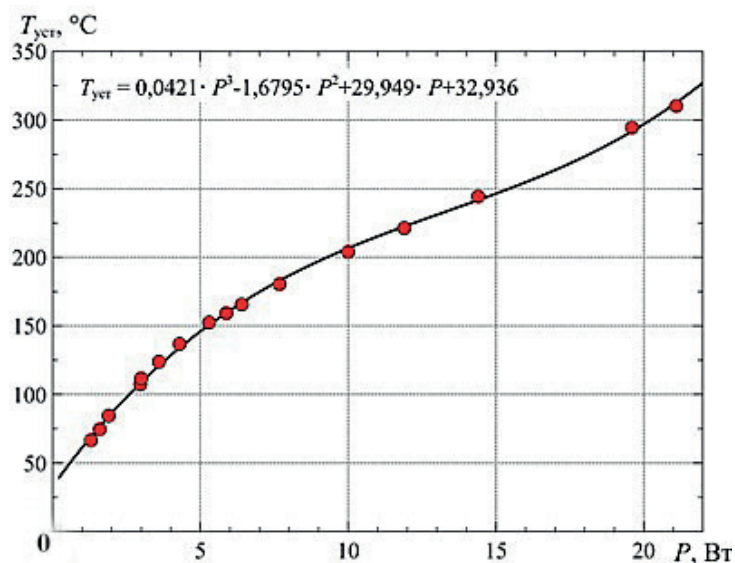


Рис. 3. Зависимость установившейся температуры нагрева проводника от рассеиваемой мощности в контактном узле

Реализация электрической схемы защиты сетевого фильтра от перегрева контактного соединения представлена на рисунке 4.

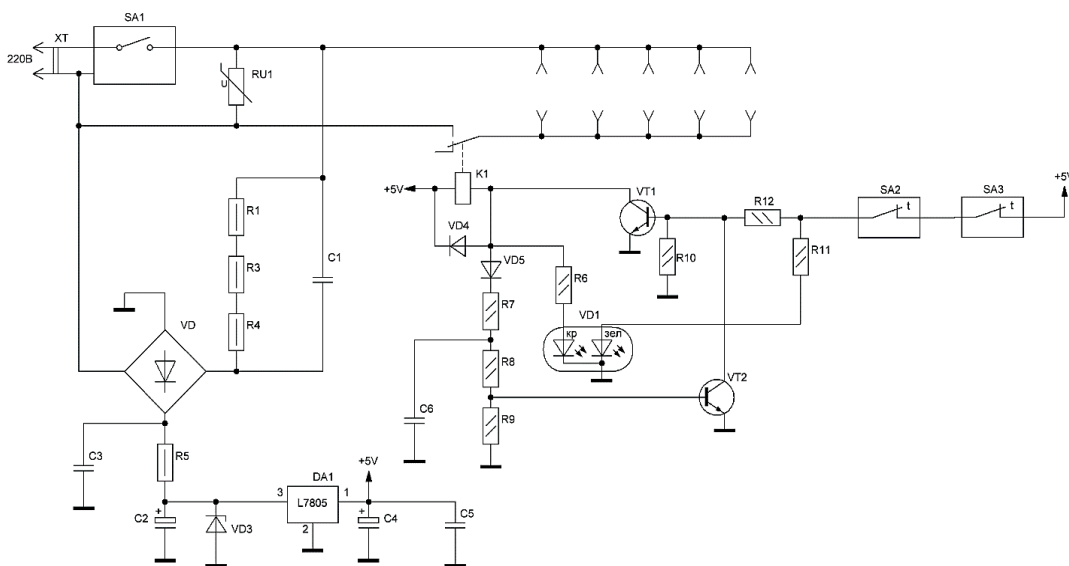


Рис. 4. Принципиальная электрическая схема сетевого фильтра с дополнительной защитой

Выбрано термореле Thermal Fuse Series с температурой срабатывания 95 ± 5 °С и температурой восстановления 70 ± 10 °С.

Схема защиты работает следующим образом. В момент включения сетевого фильтра кнопкой SA1 формируется напряжение собственных нужд 5 В,

но при этом напряжение в розетках отсутствует (реле $K1$ отключено). Если отсутствует превышение температуры термореле, реле $K1$ включено и светится зеленый светодиод. В случае превышения температуры одного из термореле зеленый светодиод гаснет, реле $K1$ отключается – нагрузка обесточивается, красный светодиод загорается. Сброс защиты произойдет только отключением и повторным включением кнопки $SA1$.

Выводы.

1. Получены зависимости для определения температуры перегрева контактов сетевого фильтра от его конструктивных и электрических параметров, позволившие обосновать температуру срабатывания термореле защиты сетевого фильтра от перегрева его контактных соединений (95 ± 5 °С) при различных сочетаниях тока в нагрузке и сопротивлении контакта для типового 5-розеточного сетевого фильтра с номинальным током 10 А.

2. Для предотвращения возгораний, вызванных контактным нагреванием сетевых фильтров, предложено установить термодатчики в местах соединительных клемм. Разработана схема защитного отключения нагрузки при перегревании одного из контролируемых контактных соединений.

Список литературы / References

1. Бершадский, И. А. Обоснование способа защиты электрической сети напряжением 220 В от перегрузок с учетом нестационарного нагрева электропроводки / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул, А. А. Кулиш // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – № 2(16). – С. 71 – 79.

Bershadskiy I. A., Zgarbul A.V., Kulish A.A. *Obosnovanie sposoba zashchity elektricheskoy seti napryazheniem 220 V ot peregruzok s uchyotom nestatsionarnogo nagreva elektroprovodki* [Validation of the method of protecting the 220 V electrical network from overloads factoring in the non-stationary heating of electrical wiring]. *Vestnik Donetskogo natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 2(16), pp. 71-79. (In Russian)

2. Бершадский, И. А. Анализ статистики пожаров по электротехническим причинам и состояния устройств защиты в сетях 0,4 кВ / И. А. Бершадский, А. В. Згарбул // Пожарная безопасность. – 2017. – № 4. – С. 119 – 125.

Bershadskiy I. A., Zgarbul A. V. *Analiz statistiki pozharov po elektrotekhnicheskim prichinam i sostoyaniya ustroystv zashchity v setyakh 0,4 kV* [Analysis of statistics on fires caused by electrical faults and the state of protection devices in the 0.4 kV networks]. *Pozharnaya bezopasnost*, 2017, no. 4, pp. 119-125. (In Russian)

3. Hadziefendic, N. Thermal imaging of poor contacts and AFCI technique for series arc breaking / N. Hadziefendic, M. Kostic, J. Trifunovic // Proceedings of II Fire Safety Consulting. – Belgrade. – 2012. – Pp. 25 – 42. (In Serbian)

4. Shea, J.J. US Patent No. 8,854,066 (3 Oct, 2014). Method and apparatus for detecting a glowing contact in a power circuit / J.J. Shea. URL: <https://patents.google.com/patent/WO2013151626A1/en> (дата обращения: 27.04.2023).

5. Nedzad, Hadziefendic. The influence of poor electrical contacts on the occurrence of initial fire and a method for their detection in low-voltage electrical installations : Doctoral Dissertation. – Belgrade : University of Belgrade, school of electrical engineering, 2019. – 237 p.

6. Solyonyj, S. Automatic System of Monitoring and Diagnostics of Sparking in Contact / S. Solyonyj, O. Solenaya, A. Roznhin // MATEC Web of Conferences 77, 12003, 2016, pp. 1-5. URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1051/mateconf/20167712003> (дата обращения: 27.04.2023).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 19.05.2023

Ilya Adolfovich Bershanskiy, Dr. Sci. (Tech.), assistant professor, chair professor;
e-mail: ibersh164@yandex.ru;

Nikita Aleksandrovich Savinov, post-graduate student; e-mail: excreman97@gmail.com
State Educational Institution of Higher Professional Education

“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Universitetskaya. Phone: (+7 949) 414-28-12

Aleksandr Yuryevich Gladkov, Cand. Sci. (Tech.), head of laboratory; e-mail: gladkov5555@rambler.ru
State Institution “Makeyevka Coal Mining Safety Scientific Research Institute”

286132, Makeyevka, 60, ulitsa Likhachyova. Phone: (+7 949) 420-16-97

Aleksandr Petrovich Kovalyov, Dr. Sci. (Tech.), professor, scientific associate; e-mail: saponenko60@mail.ru
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”

of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-79-07

VALIDATION OF TEMPERATURE PROTECTION PARAMETERS OF MAINS POWER FILTER CONNECTION TERMINAL

Purpose. Determination of the dependence between overheat temperature on the mains filter connection terminals and the construction and electrical parameters for validating the fire safe characteristics of its protection.

Methods. Theoretical principles of electrical engineering and electronics, mathematical modeling, laboratory-scale testing techniques for establishing the dependences of the conductor heating temperature at the spot of connection terminal on the period of time, transient resistance and amperage.

Results. The mathematical model of conductors heating at the mains filter connection terminal has been proposed factoring in its transient resistance, load amperage, dimensions of the heat supplying elements and the conductor surface heat transfer coefficient. The dependence of the conductor surface heat transfer coefficient of the mains filter on the power dissipation on it has been established.

Scientific novelty. The novel convenient analytical-experimental technique has been proposed for determining the equilibrium heating temperature of the mains power filter contact plates in different types of combinations of load current and transient resistance of the connection terminal.

Practical value. The critical temperature triggering the mains filter connection terminal overheat protection has been validated and the electrical circuit eliminating ignition at nominal currents has been developed.

Keywords: mains power filters; contact plate; computational method; heat transfer coefficient; equilibrium temperature; power dissipation; terminal resistance; temperature relay.

УДК [614.895.5:621.565.53]:001.891.53

Андрей Петрович Кирьян, канд. техн. наук, зам. нач.; e-mail: agz@mail.dnmchs.ru;

Алексей Борисович Серёгин, нач. каф.; e-mail: sab-1965@mail.ru

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Академия гражданской защиты» МЧС ДНР

283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34А. Тел.: (+7 856) 303-27-01, (+7 949) 311-09-10

ТЕПЛООБМЕННЫЕ И ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ПРОТИВОТЕПЛОЙ ОДЕЖДЕ С СИСТЕМОЙ ОХЛАЖДЕНИЯ РУК И НОГ СПАСАТЕЛЯ

Цель. Исследовать изменение основных показателей противотепловой одежды с новым аккумулятором холода при локальном охлаждении рук и ног спасателя для повышения его безопасности.

Методы. Теоретические исследования теплообменных и гидравлических процессов в противотепловой одежде с локальным охлаждением рук и ног.

Результаты. Периодичность движения рук (вверх-вниз) при использовании новых аккумуляторов холода АХ-5 по сравнению с ОЭ-2 уменьшено в 1,4 раза, время защитного действия костюма ПТК-80 при локальном охлаждении рук и ног спасателя увеличено в 1,5 раза при диаметре соединительной трубки $8 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ м.

Научная новизна. Впервые исследованы нестационарные теплообменные и гидравлические процессы в костюме спасателя при локальном охлаждении рук и ног аккумуляторами холода АХ-5. Были учтены температура окружающей среды, теплофизические характеристики слоев, масса АХ-5, теплообмен льда с водой.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволят усовершенствовать технические характеристики противотепловых средств, обеспечить безопасность спасателей, сократить стоимость ведения работ в экстремальных микроклиматических условиях.

Ключевые слова: спасатель; противотепловая одежда; температура; аккумулятор холода; теплообменные процессы; защитное действие; пододежное пространство.

Постановка проблемы. Большинство подземных аварий, ликвидированных спасателями, связано с экстремальными микроклиматическими условиями: температура окружающей среды 27 °С и выше, обрушения горных пород и загазованность. Удельный вес пожаров составляет 54 %. Количество аварий первой категории, связанных с пожарами, взрывами газа и пыли, на шахтах Донбасса составляет 37 % от общего количества.

Спасатели ГВГСС и МЧС работают в основном при тяжелой и очень тяжелой эрготермической нагрузке, в том числе в непригодной для дыхания среде. В настоящее время первые из них применяют методы и средства индивидуальной противотепловой защиты с водяными аккумуляторами холода, которые используют и для подготовки к таким нагрузкам. Разработанные в 90-х годах прошлого столетия, они требуют усовершенствования, особенно при длительных ликвидациях аварий. Это позволит повысить продолжительность работ и снизить их стоимость [1].

В то же время на оснащении спасателей МЧС находится термостойкая защитная одежда без аналогичного охлаждения, что при высоких эрготермических нагрузках увеличивает вероятность перегревания организма, потери здоровья и жизни.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [2] проведены исследования многократного применения аккумуляторов холода, оболочка которых выполнена из полиэтиленовой или поливинилхлоридной пленки толщиной $0,4 \cdot 10^{-3}$ м. В исследовании не учитывали предельные значения коэффициента их теплопроводности и прочности, не проведены исследования по определению времени защитного действия в противотепловой одежде спасателей при ее использовании.

В работе [3] установлено, что наиболее рационально выполнить оболочку аккумулятора холода АХ-5 из серийно выпускаемой поливинилхлоридной пленки толщиной $0,5 \cdot 10^{-3}$ м с коэффициентом теплопроводности $0,218$ Вт/(м·К). При этом установлено, что их применение по сравнению с оболочкой, выполненной из полиэтиленовой пленки аналогичной толщины, при замораживании в морозильных камерах фирмы «Норд» при температуре минус 20°C и «Зима-А» – при минус 60°C увеличено в 6 и 8 раз соответственно.

Разработан полуавтономный костюм для охлаждения спасателя с использованием воды из пожарного автомобиля [4], область применения которого ограничена.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. В работе [5] приведена уточненная математическая модель теплообменных процессов в основной части противотепловой одежды спасателя (туловища и головы) без учета локального охлаждения рук и ног. Параметры водолеяных систем охлаждения этих участков тела спасателей получены на основании экспериментальных исследований.

Цель статьи – исследовать изменение основных показателей противотепловой одежды с новым аккумулятором холода при локальном охлаждении рук и ног спасателя для повышения его безопасности.

Рассмотрены схема с кратким изложением принципа действия систем охлаждения рук и ног спасателя, методы расчета теплообменных процессов в рукавице, теплообменных и гидравлических процессов охлаждения ног, определены основные показатели противотеплового костюма ПТК-80.

Изложение основного материала и полученных научных результатов.

Рассмотрим сначала теплообменные процессы в аккумуляторе холода для охлаждения рук спасателя.

При исследовании принимаем, что оболочки рукавицы, как и брюк, имеют многослойную структуру, аналогичную оболочке основной части костюма (туловища и головы спасателя).

Принцип работы спасателя (рис. 1) заключается в следующем. В рукавице, в воздушной прослойке, находится вода, которая поглощает теплоту,

проникающую из внешней среды через слои оболочки и от поверхности кистей рук.

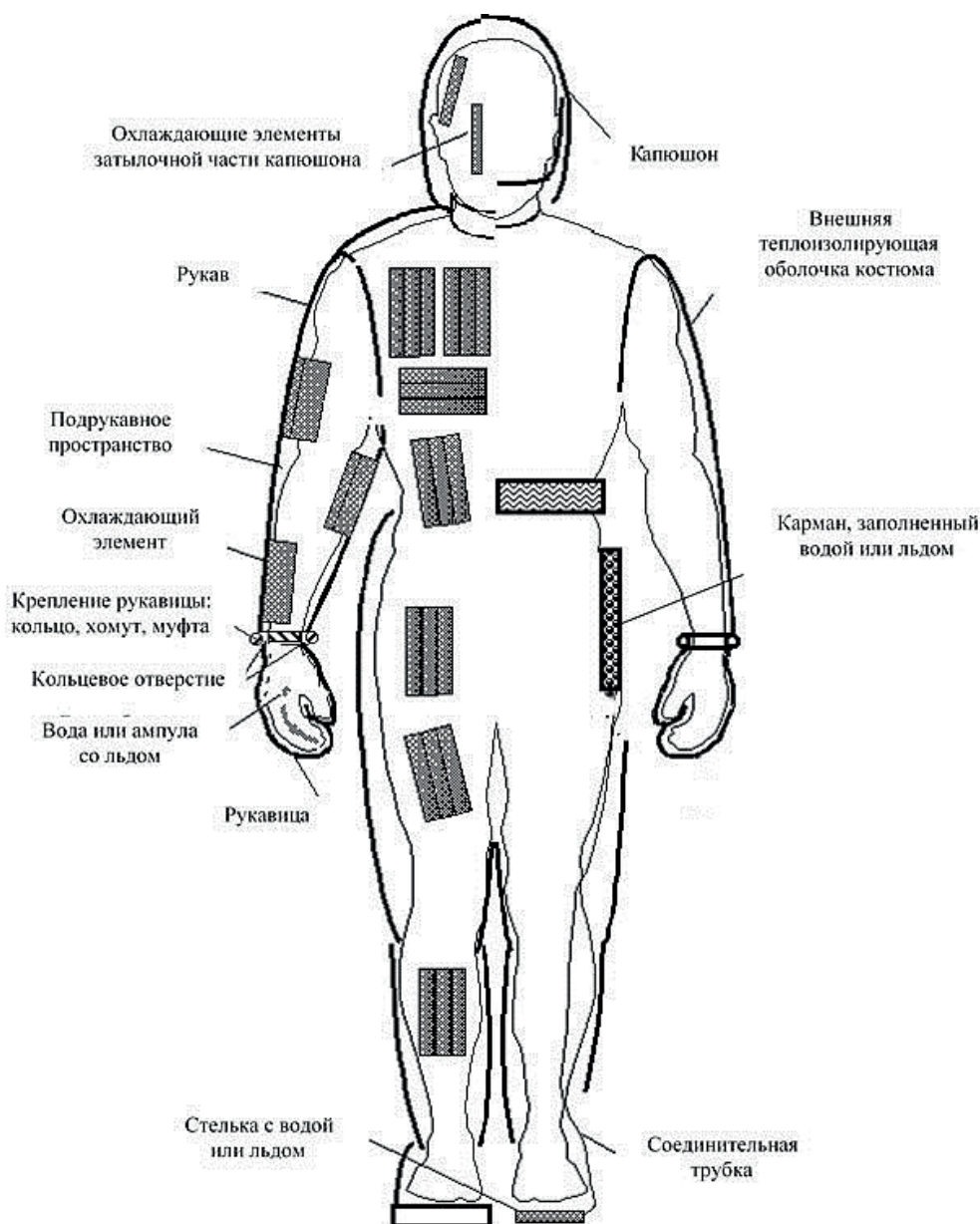


Рис. 1. Общая схема системы охлаждения в противотепловом костюме ПТК-80

Объем прослойки рукавицы на запястье соединен с подрукавным пространством между внешней и внутренней оболочками костюма. На внутренней поверхности оболочки вокруг предплечий и на уровне плеч расположены АХ-5 в решетчатом пластмассовом кармане. Наиболее важный объект исследований – подрукавное воздушное пространство между внутренним костюмом и поверхностью тела спасателя.

Температура внутри воздушного пространства – главный критерий защитных свойств костюма.

Эффективность функционирования системы охлаждения ног характеризуется количеством теплоты воды, которая нагрелась до допустимой температуры за один цикл, который зависит от времени прибывания охлажденной воды, температуры в оболочке костюма, воздушного пространства.

Компрессор служит для вытеснения жидкости в холодильник, когда стопа находится на почве, после отрывания стопы от почвы жидкость возвращается в компрессор.

Температуру воды принимали равной 0 °С, а верхний ее предел в воздушном пространстве внутри костюма не превышает 30 °С.

Скорость истечения жидкости из компрессора U^* , м/с, на основании формулы Торричелли [6].

Длительность этого периода τ_b , с, определяли по зависимости

$$\tau_b = \frac{\tilde{V}}{Q^*} = \frac{\tilde{H}\tilde{s}}{\tilde{\varphi}s_1U^*}, \quad (3)$$

где \tilde{V} – объем жидкости в компрессоре, м³;

Q^* – расход жидкости через отверстие трубопровода, м³/с;

\tilde{H} – высота компрессора, м;

$\tilde{\varphi}$ – коэффициент расхода, среднее значение которого равняется 0,62;

\tilde{s} – площадь компрессора, м²;

s_1 – площадь сечения трубопровода, м²;

U^* – скорость истечения жидкости из компрессора, м/с.

С учетом данных [1] получили $\tau_b \approx 5$ с. Для вытеснения жидкости из компрессора необходимо, чтобы стопа спасателя находилась на почве не менее 5 с, а для вытекания воды из компрессора – 1 с.

В связи с тем что скорость движения спасателей МЧС в отличие от ГВГСС в основном выше, для первых диаметр трубопровода выбран равным $8 \cdot 10^{-3}$ м, для вторых – $1 \cdot 10^{-2}$ м.

Используя математическую модель, начальные и предельные условия [1], получили результаты моделирования динамики температуры в воздушном пространстве костюма ПТК-80 при температуре окружающей среды 60 °С (рис. 3).

На основании результатов теоретических исследований установлены основные параметры костюма ПТК-80, которые приведены в таблице.

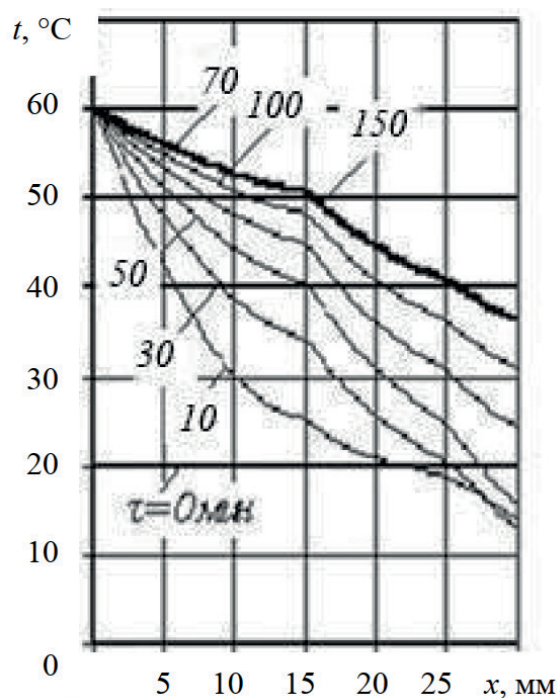


Рис. 3. Динамика температуры в пододежном пространстве костюма ПТК-80

Таблица

Основные параметры противотеплового костюма ПТК-80

Наименование показателя	Значение с ОЭ-2 / с АХ-5	
Время защитного действия при указанной температуре окружающей среды, °C, мин, не менее	60	100 / 150
	80	90 / 135
	100	75 / 113
	110	70 / 105
	150	45 / 68
Периодичность движения рук, мин	5 / 7	
Диаметр трубопровода, м	$8 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$	

Отсюда следует, что при использовании в костюме ПТК-80 аккумуляторов холода АХ-5, в сравнении с ОЭ-2 [1], время его защитного действия с приведенной системой локального охлаждения увеличено в 1,5 раза. А как приведено в работе [5], при использовании АХ-5 в основной части костюма ПТК-80 (туловища и головы) время защитного действия увеличено в 1,33 раза, что аналогично для этих участков тела в других противотепловых костюмах.

Поэтому адекватность данных результатов будет проверена при проведении экспериментальных исследований.

Выводы и перспективы дальнейших исследований в этом направлении.

1. На основании исследований гидравлических и теплообменных процессов в противотепловом костюме ПТК-80 при использовании аккумуляторов холода АХ-5, по сравнению с ОЭ-2, установлено, что периодичность движения рук увеличена в 1,4 раза, а время защитного действия – в 1,5 раза.

2. В дальнейшем необходимо провести экспериментальные исследования для проверки адекватности приведенных результатов теории.

Список литературы / References

1. Индивидуальная противогазотепловая защита / Ю. Ф. Булгаков, С. В. Борщевский, И. Ф. Марийчук, М. В. Колосниченко, Е. В. Курбацкий, Д. Д. Выговская; под общей редакцией Ю. Ф. Булгакова и И. Ф. Марийчука : монография. – Донецк : Норд Компьютер, 2016. – 250 с.

Bulgakov Yu. F., Borshchevskiy S. V., Mariychuk I. F., Kolosnichenko M. V., Kurbatskiy Ye. V., Vygovskaya D. D. *Individualnaya protivogazoteplovaya zashchita : monografiya* [Personal gas and heat protective clothing : monograph]. Donetsk, Nord Kompyuter Publ., 2016. 250 p. (In Russian)

2. Многократное применение охлаждающих элементов противотепловой одежды / В. О. Положий, И. Ф. Марийчук, О. В. Папазова, А. А. Гаврилко // Горноспасательное дело. – 2012. – Вып. 49. – С. 165 – 172.

Polozhiy V. O., Mariychuk I. F., Papazova O. V., Gavrilkov A. A. *Mnogokratnoe primeneniye okhlazhdayushchikh elementov protivoteplovoy odezhdy* [Multiple use of heat protective clothing cooling packs]. *Gornospasatelnoye delo*, 2012, issue 49, pp. 165-172. (In Russian)

3. Завьялов Г. В. Обоснование параметров противотеплового костюма с водяным охлаждением : специальность 05.26.01 «Охрана труда» : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – Донецк, 2020. – 196 с.

Zavyalov G. V. *Obosnovaniye parametrov protivoteplovogo kostyuma s vodyanym okhlazhdeniem : spetsialnost 05.26.01 “Okhrana truda” : dissertatsiya na soiskaniye uchyonoy stepeni kandidata tekhnicheskikh nauk* [Validation of parameters of heat protective suit with water cooling system : 05.26.01 “Occupational health and safety” specialty : Candidate of technical sciences dissertation]. Donetsk, 2020. 196 p. (In Russian)

4. Кирьян, А. П. Параметры аккумулятора холода для индивидуальной противогазотепловой защиты спасателей / А. П. Кирьян, А. Б. Серегин // Вестник Академии гражданской защиты. – 2022. – Вып. 3(31). – С. 15 – 21.

Kiryayn A. P., Seryogin A. B. *Parametry akkumulyatora kholoda dlya individualnoy protivogazoteplovoy zashchity spasateley* [Parameters of cold accumulator for

rescuers' personal gas and heat protection]. *Vestnik Akademii grazhdanskoj zashchity*, 2022, issue 3(31), pp. 15-21. (In Russian)

5. Кирьян, А. П. Уточненная математическая модель теплообменных процессов в противотепловой одежде спасателей / А. П. Кирьян, А. Б. Серегин // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2022. – № 4(59). – С. 94 – 102.

Kiryana A. P., Seryogin A. B. *Utochnennaya matematicheskaya model teploobmennyykh protsessov v protivoteplovoj odezhde spasateley* [Refined mathematical model of heat transfer processes in rescuer's heat protective clothing]. *Nauchnyy vestnik NII "Respirator"*, 2022, no. 4(59), pp. 94-102. (In Russian)

6. Чугаев, Р. Р. Гидравлика / Р. Р. Чугаев. – Ленинград : Энергоиздат, 1982. – 672 с.

Chugaev R. R. *Gidravlika* [Hydraulics]. Leningrad, Energoizdat Publ., 1982. 672 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 10.04.2023

Andrey Petrovich Kiryan, Cand. Sci. (Tech.); e-mail: agz@mail.dnmchs.ru;

Aleksey Borisovich Seryogin, head of chair; e-mail: sab-1965@mail.ru

State Budget Educational Institution of Higher Education "The Civil Defence Academy of the Ministry of for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters the Donetsk People's Republic"

283048, Donetsk, 34a, ulitsa Rozy Luksemburg. Phone: (+7 856) 303-27-01; (+7 949) 311-09-10

HEAT TRANSFER AND HYDRAULIC PROCESSES IN HEAT PROTECTIVE WEAR WITH COOLING SYSTEM FOR RESCUER'S ARMS AND LEGS

Purpose. To research changes in basic indices of heat protective clothing with a new cold accumulator used locally to the rescuer's arms and legs in order to increase his safety.

Methods. Theoretical studies of heat transfer and hydraulic processes in the heat protective clothing with local cooling of arms and legs.

Results. Comparing with the ОЭ-2 cold accumulators utilization of the new AX-5 ones reduced the arms up and down movements by 1.4, local cooling of arms and legs areas through the connecting tube with the diameter of $8 \cdot 10^{-3} \dots 1 \cdot 10^{-2}$ m enhanced the protective power time of the ИТК-80 heat protective suit by 1.5 times.

Scientific novelty. For the first time ever there have been conducted investigations of the non-stationary heat transfer and hydraulic processes happening in the rescuer's protective suit with local cooling of arms and legs by the AX-5 cold accumulators. The ambient temperature, thermal physical properties of layers, the AX-5 cold accumulator weight and the heat transfer between ice and water have been accounted for.

Practical novelty. The derived results of investigations will make it possible to improve the technical characteristics of the heat protective equipment, to ensure the rescuers' safety, to reduce the cost of works in extreme microclimate conditions.

Keywords: *rescuer; heat protective clothing; temperature; cold accumulator; heat transfer processes; protective power time; under-suit space.*

УДК [502.3:504.5]:621.182

Анатолий Филиппович Долженков, д-р техн. наук, заместитель директора (по научной работе); e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru;

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

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-43

АНАЛИЗ РАСЧЕТА РАССЕЙВАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В ПРИЗЕМНОМ СЛОЕ АТМОСФЕРЫ

Цель. Обоснование параметров расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы для формирования научно обоснованных прогнозов риска воздействия вредных факторов окружающей среды на здоровье человека.

Методы. При решении поставленных задач использовали современные методы научных исследований: анализ, обобщение и систематизация расчетов рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы для проведения сравнительной оценки риска загрязнения продуктами сгорания органического топлива в котельных, оборудованных котлами малой мощности.

Результаты. Определено рассеивание загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы для проведения сравнительной оценки риска ее загрязнения продуктами сгорания органического топлива в котельных, оборудованных котлами НИИСТУ-5 и Viessmann Vitoplex 100 тип PV1.

Научная новизна. Обоснованы параметры расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы, на основе которых разработаны методические подходы к проведению сравнительной оценки степени риска экологического загрязнения атмосферы при эксплуатации коммунальных котельных малой мощности.

Практическая значимость. Полученные результаты позволят существенно ограничить зону выброса вредных веществ котельными, оборудованными котлами малой мощности, и сократить выброс парниковых газов в атмосферу.

Ключевые слова: *теплоснабжающие источники; котельные малой мощности; рассеивание загрязняющих веществ; риск экологического загрязнения; приземный слой атмосферы.*

Постановка задачи. Анализ расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы заключается в выявлении и идентификации опасностей с последующей оценкой риска стойкого загрязнения атмосферы. Опасность рассматривается как источник потенциального ущерба экологии. Понятие же риска всегда включает два элемента: частоту, с которой происходит опасное событие, и последствия опасного события. Таким образом, подобный подход позволяет переводить опасность в разряд измеряемых категорий.

Проведенная в исследовании идентификация опасности применения котлов малой мощности позволила установить, что источником выбросов вредных веществ в атмосферу являются котельные, оборудованные котлами НИИСТУ-5 и Viessmann Vitoplex 100 тип PV1 [1–3].

Методы проведения анализа риска экологического загрязнения атмосферного воздуха определяются выбранными критериями приемлемого риска. При этом критерии могут быть указаны в нормативно-правовой документации или определены на этапе планирования риск-анализа.

Понятие риска используется для измерения опасности и обычно относится к индивидууму, группе населения или окружающей среде. Чтобы подчеркнуть, что речь идет об измеряемой величине, используют понятие «степень риска» или «уровень риска». Уровни приемлемого риска, в том числе и индивидуального, определяют в каждом конкретном случае. Такой подход расширяет сферу использования метода анализа риска, что необходимо для анализа опасности.

Анализ последних исследований. Анализ расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы проводят для выявления территорий, подверженных загрязнению выше допустимых норм при определенных метеоусловиях, и источников выбросов, которые вносят максимальный вклад в загрязнение приземного слоя атмосферы, а также для определения зоны влияния конкретных источников на предприятии. С целью учета совокупного выброса от источников отдельных предприятий рассчитывают зоны влияния, в которых расчетная по программе «ЭОЛ» суммарная концентрация выбросов от всех источников загрязнения данного предприятия, в том числе низких и неорганизованных выбросов, превышает 0,05 доли ПДК. Основными критериями для анализа выбраны ПДК загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы на границе санитарно-защитной зоны и контрольные точки в ближайшей жилой зоне.

Цель исследования – обоснование параметров расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы для формирования научно обоснованных прогнозов риска воздействия вредных факторов окружающей среды на здоровье человека.

Результаты исследования. Область рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы рассчитывали в программе «ЭОЛ». Согласно программе в каждой расчетной точке заданной сетки фиксируется максимально возможная приземная концентрация загрязняющего вещества с указанием направления и скорости ветра, при которых эта концентрация может иметь место, дается расшифровка долей вклада отдельных источников в общее загрязнение. В расчете также учитывали фоновые концентрации.

Расчет приземных концентраций проводили для скоростей ветра 0,5...10 м/с при шаге перебора направлений ветра 10. Расчет рассеивания выполнен по основным загрязняющим веществам, для которых $M/ПДК > \Phi$ (в соответствии с табл. 1).

Согласно результатам проведения целесообразности расчета рассеивания определены две расчетные площадки, для одной из которых выбрана промплощадка, где расположена котельная, оборудованная котлами НИИСТУ-5, под вторую – промплощадка, на которой расположена котельная, оборудованная котлами Viessmann Vitoplex 100 тип PV1. Расчет рассеивания по промплощадкам проводили без учета фоновой концентрации и с ее учетом.

Центром системы координат на промплощадке, оборудованной котлами НИИСТУ-5, выбрали дымовую трубу как источник выброса, расположенный на наибольшей высоте.

Таблица 1

Целесообразность проведения расчета рассеивания

Наименование загрязняющих веществ	ПДК _{м.р.} , ОБУВ, мг/м ³	Суммарный выброс, г/с	Суммарный выброс, доли ПДК	Средне-взвешенная высота, м	Параметр Ф	Целесообразность проведения расчета рассеивания, (М/ПДК) > Ф Да или Нет
Котельная, оборудованная котлами НИИСТУ-5						
Ртуть и ее соединения	0,003	6,217·10 ⁻⁷	0,000207	21	0,21	Нет
Диоксид азота	0,2	0,514	2,57	21	0,21	Да
Оксид углерода	5	0,108	0,0216	21	0,21	Нет
Метан	50	0,007	0,00014	21	0,21	Нет
Диазота оксид	–	0,00064	–	–	–	–
Диоксид углерода	–	374,878	–	–	–	–
Котельная, оборудованная котлами Viessmann Vitoplex 100 тип PV1						
Ртуть и ее соединения	0,003	5,3·10 ⁻⁷	0,000177	21	0,21	Нет
Диоксид азота	0,2	0,357	1,785	21	0,21	Да
Оксид углерода	5	0,089	0,0178	21	0,21	Нет
Метан	50	0,005	0,0001	21	0,21	Нет
Диазота оксид	–	0,00051	–	–	–	–
Диоксид углерода	–	309,908	–	–	–	–

Расчет рассеивания проводили для одного загрязняющего вещества – диоксида азота, так как для других веществ расчет рассеивания признан нецелесообразным. Анализ расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы показал, что превышение предельно допустимой максимальной разовой концентрации в жилой зоне без учета фоновой концентрации отсутствует и вклад источников выбросов в загрязнение атмосферы незначительный. Поскольку значения фоновых концентраций по оксиду азота (в пересчете на диоксид азота), предоставленные Гидрометеорологическим центром МЧС ДНР, установлены с учетом вклада предприятия, то необходимо определить вклад предприятия в определенную величину фоновых концентраций. Согласно п. 7.4 ОНД-86 «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» в расчетах для действующих источников используют значения фоновой концентрации $c'_ф$. Она представляет собой фоновую концентрацию $c_ф$, в которой не учитывается выброс рассмотренного источника (предприятия). Значение $c'_ф$ рассчитывают по формуле

$$c'_ф = c_ф \left(1 - 0,4 \frac{c}{c_ф} \right) \text{ при } c \leq 2c_ф; \quad (1)$$

$$c'_ф = 0,2c_ф \text{ при } c > 2c_ф,$$

где c – максимальная расчетная концентрация вещества от данного источника для точки размещения поста, на котором установлен фон, при значениях параметров выброса, относящихся к периоду времени, по данным наблюдений за который определяли фоновую концентрацию c_{ϕ} .

Максимальную расчетную концентрацию оксида азота c (в пересчете на диоксид азота) рассчитывали согласно п. 2.19 ОНД-86. Было выявлено, что в точке размещения поста, на котором был установлен фон по оксиду азота (в пересчете на диоксид азота), концентрация составила 0,13 доли ПДК, или 0,026 мг/м³ (1 ПДК = 0,2 мг/м³).

Таким образом, значение фоновой концентрации без учета выброса предприятия составляет для оксида азота (в пересчете на диоксид азота)

$$c'_{\phi} = 1,82 \cdot (1 - 0,4 \cdot (0,13/1,82)) = 1,768 \text{ доли ПДК.}$$

Сравнив фоновые концентрации, которые были предоставлены комплексной лабораторией наблюдений за загрязнением окружающей среды Гидрометеорологического центра МЧС ДНР, определенные с учетом вклада предприятия, и фоновые концентрации, которые определены без учета вклада предприятия, получим 2,86 % (0,052 доли ПДК, или 0,0104 мг/м³) по оксидам азота (в пересчете на диоксид азота).

Учитывая фоновую концентрацию, имеет место превышение предельно допустимой концентрации, потому что значение фоновой концентрации по диоксиду азота, например, в Ворошиловском районе г. Донецка составляет 1,82 доли ПДК. Значения концентраций диоксида азота приведены в таблице 2.

Таблица 2

Концентрация диоксида азота

Без учета фоновой концентрации	С учетом фоновой концентрации
0,13 доли ПДК	1,9 доли ПДК

Зона влияния котельной квартала 310 Ворошиловского теплового района Филиала «Донецктеплосеть» ГУП ДНР «Донбасстеплоэнерго», оборудованной котлами НИИСТУ-5, по диоксиду азота составляет 2832 м.

Центром системы координат на промплощадке, оборудованной котлами Viessmann Vitoplex 100 тип PV1, выбрана дымовая труба этого котла.

Анализ расчета рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы показал, что превышение предельно допустимой максимальной разовой концентрации в жилой зоне без учета фоновой концентрации отсутствует и вклад выбросов источников в загрязнение атмосферы незначительный.

Так как фоновые концентрации по оксидам азота (в пересчете на диоксид азота), предоставленные Гидрометеорологическим центром МЧС ДНР, установлены с учетом вклада предприятия, то необходимо определить вклад

предприятия в величину фоновых концентраций. Согласно п. 7.4 ОНД-86 при расчетах для действующих источников (предприятий) используют значение фоновой концентрации $c'_ф$, для этого из фоновой концентрации $c_ф$ исключают вклад рассмотренного источника (предприятия).

Значение $c'_ф$ рассчитывают по формуле (1).

Расчет максимальной расчетной концентрации оксида азота c (в пересчете на диоксид азота) позволил установить, что в точке размещения поста, на котором был определен фон по оксиду азота (в пересчете на диоксид азота), концентрация составила 0,09 доли ПДК, или 0,018 мг/м³ (1 ПДК = 0,2 мг/м³).

Таким образом, значение фоновой концентрации без учета вклада предприятия составляет для оксида азота (в пересчете на диоксид азота)

$$c'_ф = 1,82 \cdot (1 - 0,4 \cdot (0,09/1,82)) = 1,784 \text{ доли ПДК.}$$

Сравнив данные фоновых концентраций, которые были предоставлены комплексной лабораторией наблюдений за загрязнением окружающей среды Гидрометеорологического центра МЧС ДНР, установленные с учетом вклада предприятия, и значения фоновых концентраций, которые определены без учета вклада предприятия, получим 1,98 % (0,036 доли ПДК, или 0,0072 мг/м³) по оксиду азота (в пересчете на диоксид азота).

Учитывая фоновую концентрацию, установили превышение предельно допустимой концентрации, потому что значение фоновой концентрации по диоксиду азота в Ворошиловском районе г. Донецка составляет 1,88 доли ПДК. Значения концентраций диоксида азота приведены в таблице 3.

Таблица 3

Концентрации диоксида азота

Без учета фоновой концентрации	С учетом фоновой концентрации
0,09 доли ПДК	1,88 доли ПДК

Зона влияния котельной квартала 310 Ворошиловского теплового района Филиала «Донецктеплосеть» ГУП ДНР «Донбасстеплоэнерго», оборудованной котлами Viessmann Vitoplex 100 тип PV1, по диоксиду азота составляет 2535 м, что на 10,5 % меньше, чем при эксплуатации котлов НИИСТУ-5.

Количественная оценка риска угрозы здоровью, обусловленного загрязняющими веществами, определяется частотностью дополнительного риска [4, 5]. Механизмы формирования негативных эффектов, обусловленные уже существующими и дополнительными рисками, учитывают с помощью показателя частности вредных воздействий q_e . В нашем случае при одинаковых механизмах воздействия этот показатель определяют по формуле

$$q_e = q_t - q_c.$$

В соответствии с «Руководством по оценке риска для здоровья населения при воздействии химических веществ, загрязняющих окружающую среду» для оценки влияния вредного вещества, присутствующего в окружающей среде, вводят понятие «риск от дозы i вредного вещества j », который обозначен $[Pe(D)]_{ij}$. Фактически величина $[Pe(D)]_{ij}$ – вероятность, она зависит от так называемого фактора риска данного вредного вещества Fr и его дозы D . Доза измеряется в мг, а фактор риска имеет размерность мг^{-1} и представляет собой риск, приходящийся на единицу дозы. Величина фактора риска должна быть установлена в результате специальных исследований. Если связь между дозой и риском линейна, а воздействие вредного вещества не имеет предела, то величина $[Pe(D)]_{ij}$ определяется формулой

$$[Pe(D)]_{ij} = (FrD)_{ij} = (Frcvt)_{ij},$$

где v – его ежедневное поступление в организм, г;

t – время воздействия вредного вещества, с.

Выводы. Выполнив расчет рассеивания загрязняющих веществ в приземном слое атмосферы по диоксиду азота, установили, что реализация предложенных мер позволит сократить зону влияния котельной с 2832 до 2535 м и более эффективно использовать природный газ: его расход уменьшится на 1028,424 тыс. $\text{м}^3/\text{год}$. Следовательно, замена котлов НИИСТУ-5 котлами Viessmann Vitoplex 100 тип PV1 позволит сократить выброс парниковых газов в атмосферный воздух на 2048,939 т/год.

Список литературы / References

1. Долженков, А. Ф. Оценка экологического риска загрязнения атмосферы выбросами котельных малой мощности / А. Ф. Долженков, Е. К. Джалетова, А. А. Никулина // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2022. – № 1(59). – С. 77 – 82.

Dolzhenkov A. F., Dzhaletova Ye. K., Nikulina A. A. *Otsenka ekologicheskogo riska zagryazneniya atmosfery vybrosami kotelnykh maloy moshchnosti* [Assessment of environmental risk of atmosphere pollution by emissions of low-capacity boiler stations]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2022, no. 1(59), pp. 77-82. (In Russian)

2. Долженков, А. Ф. Обоснование мер по снижению риска загрязнения атмосферы котлами малой мощности / А. Ф. Долженков, Е. К. Джалетова, А. А. Никулина // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2022. – № 3(59). – С. 102 – 109.

Dolzhenkov A. F., Dzhaletova Ye. K., Nikulina A. A. *Obosnovaniye mer po snizheniyu riska zagryazneniya atmosfery kotlami maloy moshchnosti* [Substantiation of measures for reduction of risk of atmosphere pollution by emissions of low-capacity boilers]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2022, no. 3(59), pp. 102-109. (In Russian)

3. Соколов, Б. А. Котельные установки и их эксплуатация / Б. А. Соколов. – 2-е изд., испр. – Москва. : Академия, 2007. – 432 с.

Sokolov B. A. *Kotel'nye ustanovki i ikh ekspluatatsiya*. 2-e izd., isp. [Water-heating units and their operating. The 2nd revised edition]. Moscow, Academia Publ., 2007, 432 p. (In Russian)

4. Мониторинг и методы контроля окружающей среды : часть 2. Специальная / Ю. А. Афанасьев, С. А. Фомин, В. В. Меньшиков и [др.]. – Москва : Изд-во МНЭПУ, 2001. – 87 с.

Afanasyev Yu. A., Fomin S. A., Menshikov V. V. [et al.]. *Monitoring i metody kontrolya okruzhayushchey sredy: Chast 2. Spetsialnaya* [Monitoring and methods of control over the environment. Part 2. The special]. Moscow, MNEPU Press, 2001, 87 p. (In Russian)

5. Тищенко, Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: справ. изд. / Н.Ф. Тищенко. – М. : Химия, 1991. – 368 с.

Tishchenko N. F. *Okhrana atmosfernogo vozdukha. Raschyot sodержaniya vrednykh veshchestv i ikh raspredelenie v vozdukhe: sprav. izd.* [Atmospheric air protection. Calculation of content of noxious substances and their distribution in the air: reference book]. Moscow, Khimiya Publ., 1991, 368 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 11.04.2023

Anatoly Filippovich Dolzhenkov, Dr. Sci. (Tech.), deputy director (on science);
e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru;

Tatyana Olegovna Moroz, head of department; e-mail: tatiana.moroz@rambler.ru
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”
238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-43

ANALYSIS OF CALCULATION OF NOXIOUS SUBSTANCES DISPERSION IN THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LEVEL

Purpose. Validation of parameters of noxious substances dispersion in the atmospheric boundary level for scientifically grounded forecast of the risk of harmful environmental factors effecting the human health.

Methods. The contemporary methods of scientific investigations have been applied in solution of the assigned tasks, i.e. analysis, generalization and systematization of calculations of the noxious substances dispersion in the atmospheric boundary level for comparative assessment of risk of pollution by the organic fuel combustion products.

Results. The noxious substances dispersion in the atmospheric boundary level has been conducted for the comparative assessment of risk of its pollution by combustion products of the organic fuel in the boiler stations equipped with the НИИСТУ-5 and Viessmann Vitoplex 100 type PV1 boilers.

Scientific novelty. The calculation parameters for noxious substances dispersion in the atmospheric boundary level have been validated and taken as a basis for the developed methodological approaches to conduction of the comparative assessment of the environmental pollution risk of operating the communal low-capacity boiler stations.

Practical value. The obtained results will permit to limit the area of noxious substances emissions from the boiler stations equipped with low-capacity boilers significantly and to reduce the greenhouse gases emissions into the atmosphere.

Keywords: *sources of heat supply; low-capacity boiler stations; noxious substances dispersion; environmental risk; atmospheric boundary level.*

УДК 621.841.245:621.313.012.5

Владелен Валерьевич Гуржий, ст. науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru;

Александр Андреевич Березин, инж.; e-mail: fire408@mail.ru

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-80

ВЛИЯНИЕ СВЕРХТОКА НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ БОЛЬШИХ ПЕРЕХОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЙ В КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

Цель. Исследовать влияние сверхтока на формирование пластических деформаций элементов контактных соединений электроустановок, приводящих к возникновению большого переходного сопротивления, для установления механизма его возникновения и развития.

Методы. Аналитические и теоретические исследования.

Результаты. Расчет напряжения в шине при тепловом расширении позволил обосновать влияние температурного цикла на возникновение больших переходных сопротивлений в контактных соединениях электроустановок.

Научная новизна. Впервые установлен механизм возникновения большого переходного сопротивления в результате теплового расширения элементов контактных соединений электроустановок.

Практическая значимость. Результаты исследований позволяют оценить влияние динамических температурных циклов электроустановок на возникновение аварийных режимов работы в контактных соединениях, а также обосновать механизм возникновения аварийного режима работы для установления причины пожара.

Ключевые слова: *аварийные режимы работы; большое переходное сопротивление; контактное соединение; электроустановка; сверхток.*

Постановка проблемы. Исследованию следов аварийных режимов работы в электроустановках уделяется особое внимание при определении причины пожара. Установление фактов аварийных режимов работы электроустановок и их причастности к возникновению пожара важно для решения вопроса о непосредственной (технической) причине пожара.

Большое переходное сопротивление – аварийный пожароопасный режим, возникающий при переходе электрического тока с одной контактной поверхности на другую. Большое переходное сопротивление образуется локально, в местах контактных соединений электроустановок, сопровождается тепловыделением, разлетом искр и возникновением электрической дуги, что приводит к оплавлению контактирующих поверхностей и термодеструкции изоляции с последующим воспламенением близлежащих горючих веществ и материалов [1, 2].

Согласно статистическим данным [3], 14 % случаев брака элементов контактных соединений приходится на зажимы и детали, а 20 % неисправностей электроустановок возникает вследствие нагревания в контактных соединениях.

В «Методических рекомендациях по определению признаков большого переходного сопротивления и температуры нагрева электроустановок» указаны основные причины возникновения большого переходного сопротивления как пожароопасного режима работы электроустановок:

- недостаточное усилие прижатия в контактных соединениях;
- окисление контактных поверхностей;
- вибрационная нагрузка;
- недостаточная площадь контактных поверхностей;
- несоответствие выполнения монтажа контактных соединений Правилам устройства и эксплуатации электроустановок;
- заводские дефекты контактных соединений и кабельных изделий;
- старение изоляции кабельных изделий.

Исследования влияния сверхтока на возникновение аварийного режима работы в контактных соединениях имеют общий характер.

Согласно ГОСТ Р 51327.1–99. «Выключатели автоматические, управляемые дифференциальным током, бытового и аналогичного назначения со встроенной защитой от сверхтоков» сверхток – это ток, величина которого превышает номинальное значение. При протекании сверхтока по проводнику его температура возрастает, что приводит к возникновению теплового расширения в элементах контактных соединений. В соответствии с ГОСТ Р 51321.1–2007. «Устройства комплектные низковольтные распределения и управления» соединения токопроводящих частей не должны значительно изменяться при повышении температуры, допускаемой при нормальной эксплуатации электроустановок. Необходимо учитывать влияние на контактные соединения теплового расширения, а также стойкость материалов контактных соединений к воздействующим температурам. Таким образом, возникает необходимость исследования влияния сверхтока на возникновение большого переходного сопротивления вследствие теплового расширения элементов контактных соединений.

Цель работы – исследовать влияние сверхтока на формирование пластических деформаций элементов контактных соединений электроустановок, приводящих к возникновению большого переходного сопротивления, для установления механизма его возникновения и развития.

Изложение основного материала. Рассмотрим возникновение теплового расширения элементов контактных соединений на примере болтового контактного соединения шин, то есть основного вида соединения шин низковольтных комплектных устройств.

Изменение температуры в большом контактном соединении происходит вследствие изменения температуры окружающей среды, а также изменения величины тока нагрузки. Как правило, изменение токовых нагрузок происходит в пределах $(0,1-1,1)I_n$, где I_n – номинальный ток нагрузки, а при пусковых токах – в пределах $(5-7)I_n$. Кроме того, электродинамическая сила, которая

возникает при протекании тока, становится причиной ослабления болтового контактного соединения [4].

Рассмотрим основные тепловые режимы работы электроустановки, в которой в качестве проводников используют алюминиевые шины.

Считаем, что электроустановку эксплуатируют при нормальной температуре окружающей среды (25 ± 10) °С, температура в болтовом контактном соединении достигает 95 °С, а при возникновении аварийного режима работы согласно ГОСТ 10434–82. «Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования» температура в контактных соединениях электроустановок может достигать 300 °С. При этом образуется динамический температурный цикл: $20\text{ °С} \leftrightarrow 95\text{ °С} \leftrightarrow 300\text{ °С} \leftrightarrow 20\text{ °С}$.

Для дальнейшего исследования рассмотрим болтовое контактное соединение с двумя алюминиевыми шинами толщиной 10 мм, которые стянуты стальными болтом и гайкой (рис. 1).

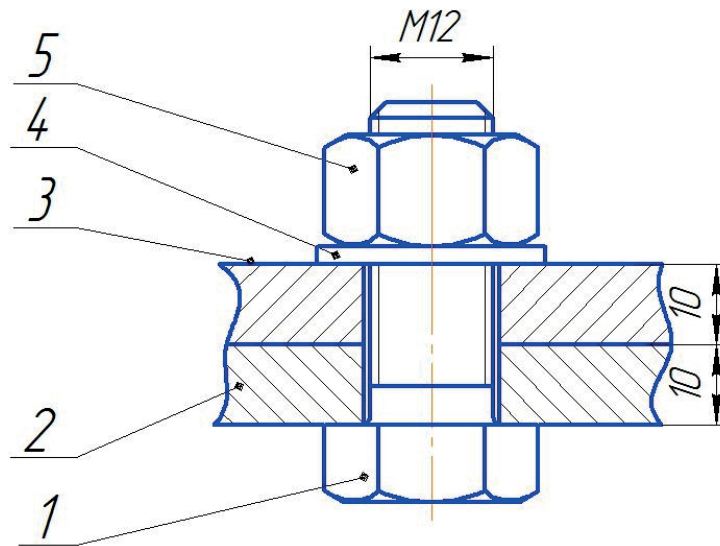


Рис. 1. Болтовое соединение шин:

1 – болт; 2, 3 – алюминиевые шины; 4 – шайба; 5 – гайка

Коэффициент теплового расширения для алюминия составляет $a = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ °С}^{-1}$, для стали $a = 1,25 \cdot 10^{-5} \text{ °С}^{-1}$. Таким образом, при изменении температуры от 20 °С до предельно допустимой рабочей температуры алюминиевых шин 95 °С (в соответствии с ГОСТ 10434–82) крепежные элементы будут препятствовать расширению алюминиевой шины.

Выполним расчет удлинения шины $\Delta l_{\text{ш}}$ и болта $\Delta l_{\text{б}}$ при тепловом расширении [5]

$$\Delta l = a l \Delta t, \quad (1)$$

где l – первоначальная длина шины и болта, м;

Δt – величина изменения температуры контактных соединений, °С.

Удлинение алюминиевой шины

$$\Delta l_{\text{ш}} = 2,22 \cdot 10^{-5} \cdot 0,020 \cdot 75 = 3,33 \cdot 10^{-5} = 0,0333 \text{ мм.}$$

Удлинение стального болта

$$\Delta l_{\text{б}} = 1,25 \cdot 10^{-5} \cdot 0,020 \cdot 75 = 1,85 \cdot 10^{-5} = 0,0185 \text{ мм.}$$

Таким образом, при $\Delta l_{\text{ш}} > \Delta l_{\text{б}}$ элементы болтового контактного соединения будут препятствовать расширению шины более чем на 0,0185 мм, что приведет к появлению напряжений σ_t в шине и болте, что, в свою очередь, может вызвать деформацию шины или разрыв болта.

Для дальнейшего исследования влияния теплового расширения на деформацию элементов болтового контактного соединения представим его механической моделью, где роль бруса с жестко заделанными концами выполняют соединяемые шины (рис. 2).

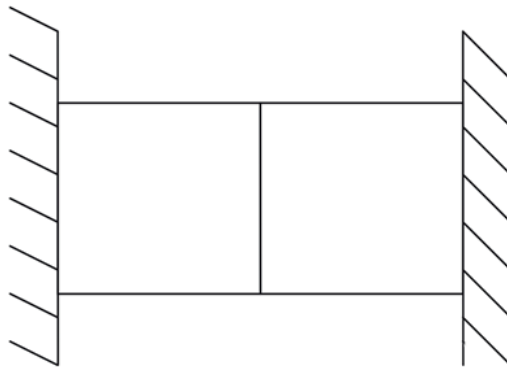


Рис. 2. Механическая модель болтового контактного соединения с алюминиевыми шинами

Выполним расчет температурных напряжений в поперечных сечениях бруса (шин) по формуле [5]

$$\sigma_t = \sigma_f E = 2,22 \cdot 10^{-5} \cdot 75 \cdot 7^{11} = 166\,500\,000 \text{ Па} = 166,5 \text{ МПа}, \quad (2)$$

где E – модуль упругости (для алюминия $E = 7^{11}$ Па, ГОСТ 30323–95 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания»).

Учитывая, что первоначальная затяжка болта М12 (размер головки 19, момент на ключе 70 Н·м) создает напряжение в шине под головкой, получим

$$\sigma_3 = \frac{F_3}{A} = \frac{23000}{0,00017} = 135200000 \text{ Па} = 135,2 \text{ МПа}, \quad (3)$$

где $F_3 = 23000$ – сила затяжки (для момента 70 Н·м), Н;

$A = 0,00017$ – площадь поверхности шины под головкой болта (для головки 19), м².

Суммарное напряжение в шине при тепловом расширении составит

$$\sigma_\Sigma = \sigma_t + \sigma_3 = 166,5 + 135,2 = 301,7 \text{ МПа}. \quad (4)$$

Допустимое напряжение для алюминиевых сплавов согласно ГОСТ 30323–95. «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания» и ГОСТ Р 50254–92. «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета электродинамического и термического действия тока короткого замыкания» составляет 247 МПа.

Таким образом, при превышении допустимого предела напряжения $\sigma_\Sigma > 247$ МПа шина между головкой болта и гайкой при возникновении теплового расширения в результате повышения температуры на 75 °С будет пластически деформироваться, в результате произойдет изменение ее начальных геометрических параметров. После охлаждения болтового контактного соединения до 20 °С между шинами, болтом и гайкой будут формироваться зазоры, то есть будет происходить пластическая деформация элементов, а следовательно, уменьшится усилие прижатия. Это приведет к увеличению переходного сопротивления, которое сопровождается тепловыделением, что создает дополнительную деформацию контактирующих поверхностей и уменьшает площадь контактных соединений. Вследствие этого согласно закону Джоуля – Ленца усиливается тепловыделение в контактных соединениях и образуются микроскопические дуговые разряды, которые приводят к оплавлению контактных поверхностей. Это создает пожарную опасность. Оплавления на поверхности алюминиевой шины и головки болта, вызванные большим переходным сопротивлением, представлены на рисунке 3.

Установленный механизм развития пожароопасного процесса вследствие повышения температуры в контактных соединениях, вызванного протеканием сверхтока, представлен на рисунке 4.

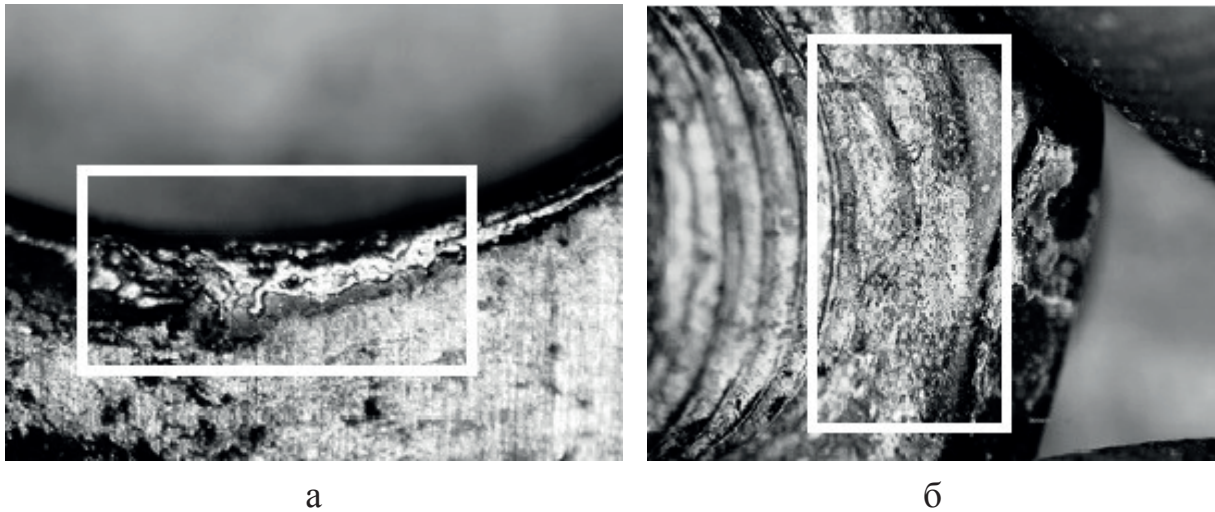


Рис. 3. Оплавления на поверхности:
а – алюминиевой шины; б – головки болта

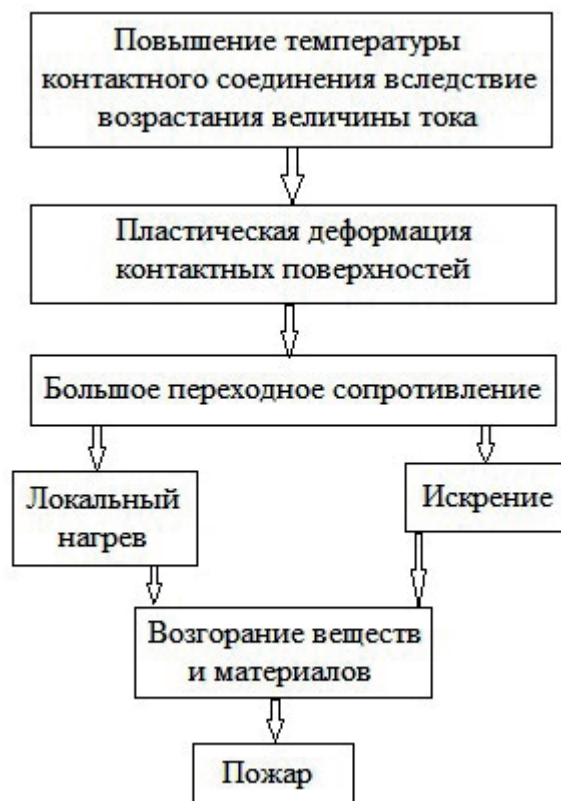


Рис. 4. Блок-схема развития пожароопасного процесса

Выводы. Выполненные расчеты удлинения алюминиевой шины вследствие теплового расширения, вызванного температурным циклом «нагревание–охлаждение», в результате протекания сверхтока и температурных напряжений в элементах контактных соединений позволили установить, что при повышении температуры элементы болтового контактного соединения препятствуют

расширению шин, а при охлаждении приводят к изменению их геометрических параметров и дальнейшему развитию аварийного режима работы. Данные факторы обуславливают необходимость выбора материалов контактных соединений в соответствии с нагрузкой, а также выполнения профилактических мероприятий, направленных на поддержание требуемого усилия прижатия в контактных соединениях.

Список литературы / References

1. Гуржий, В. В. Признаки больших переходных сопротивлений в контактных соединениях / В. В. Гуржий, Е. О. Зинченко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2018. – № 2(55). – С. 74 – 79.

Gurzhiiy V. V., Zinchenko Ye. O. *Priznaki bolshikh perekhodnykh soprotivleniy v kontaktnykh soyedineniyakh* [Marks of high transient resistances in contact joints]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2018, no. 2(55), pp. 74-79. (In Russian)

2. Гуржий, В. В. Искровые разряды в контактных соединениях электроустановок / В. В. Гуржий, Е. О. Зинченко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2019. – № 2(56). – С. 22 – 27.

Gurzhiiy V. V., Zinchenko Ye. O. *Iskrovyye razryady v kontaktnykh soyedineniyakh elektroustanovok* [Spark discharges in contact connections of electrical installations]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2019, no. 2(56), pp. 22-27. (In Russian)

3. Кавлак, Р. С. Определение состояния электрического соединения при действии токов разной величины / Р. С. Кавлак, С. А. Власенко, И. В. Игнатенко // Научно-техническое и социально-экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке : труды Всероссийской научно-практической конференции творческой молодежи с международным участием (Хабаровск, 18–21 апреля 2017 г.). В 2 т. Т. 1 / под ред. С. А. Кудрявцева. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. – С. 61 – 64.

Kavlak R. S., Vlasenko S. A., Ignatenko I. V. *Opredeleniye sostoyaniya elektricheskogo soedineniya pri deystvii tokov raznoy velichiny* [Diagnostics of electrical joint state during actions of current of different value]. *Nauchno-tekhnicheskoye i sotsialno-ekonomicheskoye sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: trudy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii tvorcheskoy molodyozhi s mezhdunarodnym uchastiyem (Khabarovsk, 18-21 aprelya 2017 g.)*. In 2 volumes, vol. 1, Kudryavtseva S. A. [ed.]. Khabarovsk, DVUGPS Press, 2017, pp. 61-64. (In Russian)

4. Измайлов, В. В. Автоматизированная система прогнозирования остаточного ресурса электроконтактных соединений / В. В. Измайлов, А. Е. Наумов // Программные продукты и системы. – 2008. – № 2. – С. 73 – 75.

Izmaylov V. V., Naumov A. Ye. *Avtomatizirovannaya sistema prognozirovaniya ostatochnogo resursa elektrokontaktnykh soyedineniy* [Automated system for prediction of residual life of electrical contact joints]. *Programmnyye produkty i sistemy*, 2008, no. 2, pp. 73-75. (In Russian)

5. Цывилский, В.Л. Техническая механика: Теоретическая механика и сопротивление материалов. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 2005. – 344 с.

Tsyvil'skiy V. L. *Tekhnicheskaya mekhanika: Teoreticheskaya mekhanika i soprotivleniye materialov. 2-e izd., pererab. i dop.* [Engineering mechanics. Classical mechanics and strength of materials. The 2nd edition, revised and supplemented]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005, 344 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук П. Е. Мухиным
Дата поступления рукописи 10.02.2023

Vladelen Valeryevich Gurzhiy, senior scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

Aleksandr Andreyevich Berezin, engineer; e-mail: fire408@mail.ru

State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”

of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-80

INFLUENCE OF OVERCURRENT ON OCCURRENCE OF HIGH TRANSIENT RESISTANCES IN CONTACT JOINTS OF ELECTRICAL INSTALLATIONS

Purpose. To investigate how overcurrent flow affects the formation of plastic stresses in the elements of contact joints of the electrical installations which lead to high transient resistance in order to define the mechanism of its breaking out and development.

Methods. Analytical and theoretical investigations.

Results. The calculation of voltage in bus bar under the heat expansion made it possible to substantiate the influence of a temperature cycle on occurrence of the high transient resistances in the contact joints of the electrical installations.

Scientific novelty. First time ever there has been established a mechanism of high transient resistance occurrence resulting from the heat expansion of elements in the contact joints of the electrical installations.

Practical value. The results of investigations permit to assess the influence of dynamic temperature cycles of the electrical installations on the occurrence of emergency modes in the contact joints and to substantiate the mechanism of triggering the emergency mode for determination of the cause of a fire.

Keywords: *emergency modes; high transient resistance; contact joint; electrical installation; overcurrent.*

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕРКИ И ИСПЫТАНИЯ СЕТИ НАРУЖНОГО И ВНУТРЕННЕГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ УПСВ



Предназначено для проверки давления и расхода воды в сети наружного и внутреннего противопожарного водоснабжения. Устройство УПСВ стойко к воздействию внешних климатических факторов во время эксплуатации, транспортирования и хранения согласно ГОСТ 15150–69. Отличительной особенностью УПСВ по сравнению с другими аналогичными устройствами является определение по единой шкале расхода и давления воды.

Техническая характеристика

Наименование показателя	Значение
Рабочее давление, МПа	0,05–1,0
Пропускная способность, л/с	2,5–11
Габариты в частично разобранном состоянии, мм, не более	290×240×200
Масса в частично разобранном состоянии, кг, не более	4
Срок службы, лет	5

ШКАФ СУШИЛЬНЫЙ «БРИЗ»



Предназначен для сушки пожарных рукавов различных типоразмеров и боевой одежды пожарного. Выполнен в климатическом исполнении У категории размещения 3 по ГОСТ 15150–69 для эксплуатации при температуре окружающей среды от плюс 5 °С до плюс 35 °С и относительной влажности воздуха 80 %. В шкафу установлены вытяжной вентилятор, два тепловентилятора с керамическими нагревательными элементами для нагревания воздуха, снабженные системой защиты от перегрева, что обеспечивает пожарную безопасность. В комплект входят две пары вешалок для сушки боевой одежды и обуви пожарного.

Техническая характеристика

Наименование показателя	Значение
Количество одновременно высушиваемых пожарных рукавов внутренним диаметром: 51 мм; 66 мм; 71 мм, шт., не более	6; 4; 3
Количество высушиваемой боевой одежды пожарного или обуви и перчаток, комплектов, не более	2
Температура сушки латексных пожарных рукавов, °С, не более	45
Температура сушки тканевых пожарных рукавов или боевой одежды пожарного, °С, не менее	30
Общая электрическая мощность, кВт	4,01
Габаритные размеры, мм	1890×1180×750
Масса, кг	99

КОНТЕЙНЕР СПАСАТЕЛЬНЫЙ КС-1



Предназначен для доставки средств медицинского назначения при оказании помощи пострадавшим на месте происшествия и на этапе эвакуации в лечебное учреждение. Согласно таблице минимального оснащения контейнер входит в состав снаряжения отделения ГВГСС, направляемого для ликвидации различного вида аварий и спасения людей. Контейнер обеспечивает размещение в нем медикаментов (в ампулах, тубах, пакетах, блистерах), перевязочных материалов, инструментов и других средств медицинского назначения.

Техническая характеристика

Наименование показателя	Значение
Габаритные размеры, мм	460×360×140
Масса контейнера без комплекта медицинских средств, кг	6
Масса комплекта медицинских средств, кг	7
Время подготовки контейнера к эксплуатации, с, не более	30

РАНЦЕВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ТУШЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРА ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ УПТВ



Предназначена для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой. Принцип действия основан на газодинамическом распылении воды и последующем ускорении капельного потока в разгонном сопле. Высокая кинетическая энергия струи позволяет эффективно преодолевать кинетический и тепловой барьеры конвективных потоков, доставляя в очаг пожара тонкодисперсную воду. Эффективность тушения достигается за счет большой площади поверхности капельной жидкости и быстрого отбора теплоты из очага пожара при минимальном объеме расходуемой воды.

Техническая характеристика

Наименование показателя	Значение
Дальность подачи воды, м, не менее	16
Объем воды или воды с добавками, дм ³ , не менее	9,8
Запас воздуха, дм ³ , не менее	2 × 400
Расход воды, дм ³ /с, не менее	0,35
Расход воздуха, подаваемый на ствол, кг/с, не более	0,013
Длительность подачи воды, с, не менее	28
Номинальное время защитного действия дыхательного аппарата при легочной вентиляции 30 дм ³ /мин, мин, не менее	12
Масса опытного образца (без воды), кг, не более	21,5

Правила оформления авторских рукописей для опубликования в журнале «Научный вестник НИИ «Респиратор»

К рассмотрению принимаются авторские рукописи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступом 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 150 до 250 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурирован и содержать следующие элементы: цель; методы; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (не менее 5 слов) на русском и английском языках;
- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации.

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 (постановка задания);
- описание методов (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 10 страниц. Рекомендуются, 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, фотоснимки и др.) предоставляются в виде отдельных файлов общепринятых графических форматов (jpeg, bmp). Диаграммы, схемы, графики должны быть доступны для редактирования (Word, Excel, Paint, CorelDRAW, Компас-3D и др.). *Рисунки* (диаграммы, фотоснимки и др.) располагают вместе с текстом в местах ссылок на них. Изображения должны быть четкими и контрастными, иметь разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруют, если их два или более. Подрисуночные подписи обязательны. Недопустимо включать их в сам рисунок.

Формулы выполняются в редакторе Math Type (кроме однострочных), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом и располагают по центру строки. Номер формулы указывается справа в круглых скобках. Нумеруют только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы располагаются в книжной ориентации, они должны иметь заголовки и быть пронумерованными, если их две или более. Размер таблицы не должен превышать страницу.

Список литературы (не менее 5 и не более 15 источников) приводят в порядке упоминания в тексте; обозначают цифрами в квадратных скобках. Порядок изложения элементов библиографического описания на русском языке определен требованиями ГОСТ Р 7.0.100-2018. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из различных изданий. В списке литературы должно быть не более 20 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи. Не следует включать в список литературы нормативные документы, ГОСТы, патенты; ссылки на них должны быть даны непосредственно в тексте статьи.

Рукопись должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами.

После рецензирования редакция регистрирует авторскую рукопись и совместно с автором ведет подготовку к публикации. Перед публикацией автору представляется отредактированный сверстаный вариант рукописи для ознакомления.

Авторские рукописи, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Ответственность за содержание статьи несет автор.

Авторские рукописи, которые не соответствуют данным требованиям, не рассматриваются.

Порядок рецензирования авторских рукописей для опубликования в журнале «Научный вестник НИИ «Респиратор»

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию авторских рукописей, соответствующих специализации и тематике издания, с целью их экспертной оценки.

Поступившая в редакцию рукопись научной статьи рассматривается главным редактором (заместителем главного редактора) на предмет соответствия профилю журнала. Если рукопись соответствует тематике журнала и содержит новые актуальные результаты, то ее направляют рецензентам (соответствующего профиля) для экспертной оценки.

Рецензент оценивает рукопись и дает заключение о целесообразности ее публикации.

При наличии в рецензии (рецензиях) замечаний по содержанию статьи, но при условии в целом положительных рецензий, статья отправляется автору на доработку, после чего эта статья по решению редакции может быть либо опубликована, либо направлена на повторное рецензирование.

В том случае, если рецензия содержит в целом отрицательный отзыв на статью, по решению редакции статья может быть либо снята с публикации, либо направлена автору для доработки. Доработанная статья после поступления в редакцию в обязательном порядке направляется на повторное рецензирование. Статьи, получившие две отрицательные рецензии подряд, не публикуются.

Оригиналы рецензий хранятся в редакции журнала в течение 5 лет.

Научный вестник НИИ «Респиратор»

2023, № 2(60)

На русском и английском языках

Ответственный редактор Л.В. Барзий

Технический редактор Н.Н. Грибенюк

Переводчик Л.А. Ахундова

Учредитель и издатель

*Государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

Поступившие на издание авторские рукописи проходят рецензирование

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность
за использование сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано к выходу в свет 23.06.2023.

Адрес редакции и издателя: ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»,

ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+7 856) 332-78-01; 332-78-60

Объем 7,73 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 27 июня 2023 г.