



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

# **НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»**

Научно-технический журнал

№ 2(56)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

---

---

Донецк  
2019

---

---

УДК 614.8"363"+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2019. – № 2(56). – 116 с.

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

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

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

#### **Редакционная коллегия:**

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

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 2 от 28.03.2019).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters

# **SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD "RESPIRATOR"**

Scientific-technical journal

No. 2(56)

Published quarterly

Founded in 1970

---

---

Donetsk  
2019

---

---

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2019. – No. 2(56). – 116 p.

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

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

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

#### **Editorial board:**

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

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 2 from 28.03.2019).

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

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

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

**СОДЕРЖАНИЕ*****I. Пожарная и промышленная  
безопасность*****Агеев В.Г., Кострубицкий А.А.,  
Зинченко И.Н.**Обоснование и расчёт параметров  
комбинированного тушения пожаров  
водой и пеной

7

**Сынков В.Г., Мороз Т.О.**Нанотехнологии для обеспечения  
пожаро- и взрывобезопасности в шахтах

14

**Гуржий В.В., Зинченко Е.О.**Искровые разряды в контактных  
соединениях электроустановок

22

**Диденко А.А.**Противопожарные разрывы как  
средство локализации подземных  
пожаров

28

***II. Безопасность в чрезвычайных  
ситуациях*****Карнаух Н.В., Мавроди А.В.,  
Захлебин В.В., Агарков А.В.**Компьютерное моделирование  
аварийных режимов проветривания  
шахты

37

**Коляда А.Ю., Реутов Д.В.,  
Дикенштейн И.Ф., Балта Д.Ф.**Локализация пожаров на открытых  
складах сельскохозяйственных кормов

47

**Козлитин А.А., Лебедева В.В.,  
Непочатых И.Н., Лукомская Т.М.**Хроматографический метод  
обнаружения наноконцентраций  
нефтепродуктов

60

**TABLE OF CONTENTS*****I. Fire and industrial safety*****Ageyev V.G., Kostrubitskiy A.A.,  
Zinchenko I.N.**Substantiation and calculation of parameters  
of the combined fighting of fires with water  
and foam**Synkov V.G., Moroz T.O.**Nanotechnologies for guaranteeing the fire-  
and explosion safety in mines**Gurzhiy V.V., Zinchenko Ye.O.**Spark discharges in contact connections  
of electrical installations**Didenko A.A.**Fire breaks as means of localization  
of underground fires***II. Safety in emergencies*****Karnaukh N.V., Mavrodi A.V.,  
Zakhlebin V.V., Agarkov A.V.**Computer modeling the emergency  
conditions of mine ventilation**Kolyada A.Yu., Reutov D.V.,  
Dikenshteyn I.F., Balta D.F.**Localization of fires in ground agricultural  
feed storages**Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.,  
Nepochatykh I.N., Lukomskaya T.M.**Chromatographic method for detection  
of nanoconcentrations of oil products

**Козлитин А.А., Лебедева В.В.,  
Непочатых И.Н., Лукомская Т.М.**  
Идентификация нефтепродуктов по  
результатам хроматографического  
исследования алканов

68

**Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.,  
Nepochatykh I.N., Lukomskaya T.M.**  
Identification of oil products by results  
of chromatographic investigation  
of alkanes

**III. Охрана труда и экологическая  
безопасность**

**Пашковский П.С., Карнаух Н.В.,  
Мавроди А.В.**  
Нормализация газового режима  
выемочного участка при отключении  
системы дегазации

78

**Pashkovskiy P.S., Karnaukh N.V.,  
Mavrodi A.V.**  
Normalization of gas conditions  
of a working area by disconnection  
of a degassing system

**Греков С.П., Всякий А.А.,  
Старикова И.Г.**  
Тепловой эффект дросселирования  
метана из отторгнутого от массива угля

88

**Grekov S.P., Vsyakiy A.A.,  
Starikova I.G.**  
Thermal effect of the methane throttling from  
coal separated from the massif

**Булгаков Ю.Ф., Дикенштейн И.Ф.,  
Заверюха В.В.**  
Метановыделение в забое тупиковой  
горной выработки

95

**Bulgakov Yu.F., Dikenshteyn I.F.,  
Zaveryukha V.V.**  
Methane release in a coal-face of a blind  
drift of a mine

**Зборщик Л.А., Плетенецкий Р.С.,  
Чапкович А.В., Францев В.И.**  
Универсальный контрольный прибор  
для проверки респираторов

105

**Zborshchik L.A., Pletenetskiy R.S.,  
Chapkovich A.V., Frantsev V.I.**  
An universal control device for testing  
breathing apparatus

**Требования к оформлению статьи**

115

**Requirements of execution of an article**

## I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [614.844.2+614.844.5]:614.841.45

*Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, директор; e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru)*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-00;*

*Алексей Александрович Кострубицкий, министр; e-mail: [mchs-dnr@mail.ru](mailto:mchs-dnr@mail.ru)*

*Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР*

*283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел. (+38062) 340-62-28;*

*Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: [zinstar@mail.ru](mailto:zinstar@mail.ru)*

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

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81*

### ОБОСНОВАНИЕ И РАСЧЁТ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ВОДОЙ И ПЕНОЙ

**Цель.** Повышение эффективности комбинированного тушения пожара водой и пеной в помещении путём предварительного прогнозирования времени тушения.

**Методика.** Аналитические и экспериментальные исследования тушения пожара водой и пеной, адекватность математической модели механизма подавления пламени; расчет параметров работы пожарного ствола и времени тушения пожара водой и пеной.

**Результаты.** Рассмотрен водный и пенный комбинированный метод тушения пожара, основанный на проявлении огнетушащими веществами механизма прекращения горения и тления. Получены расчетные формулы для определения интенсивности подачи сначала воды, а затем и пены и времени тушения пожара. Изложен порядок расчёта и приведен пример расчёта параметров комбинированного тушения пожара водой и пеной в процессе истечения огнетушащего вещества.

**Научная новизна.** Повышение эффективности комбинированного тушения пожара водой и пеной путём разработанного расчётного метода прогноза необходимой интенсивности подачи огнетушащих веществ и времени тушения.

**Практическая значимость.** Полученные результаты исследований позволяют повысить эффективность комбинированного тушения пожара водой и пеной путем последовательного действия огнетушащих веществ.

**Ключевые слова:** помещение; пожар; тушение; пожарный ствол; вода; пена; интенсивность подачи; расчёт параметров; температура пламени; пожарная нагрузка; площадь горения; время тушения.

**Постановка проблемы и анализ последних исследований.** Результаты ранее проведенных теоретических и экспериментальных исследований в натуральных условиях [1–3], их сравнение и проверка адекватности предложенной математической модели позволили обосновать параметры комбинированного тушения пожаров в помещениях сначала водой, а затем пеной.

**Цель.** Повышение эффективности комбинированного тушения пожара водой и пеной в помещении путем предварительного прогнозирования времени тушения.

**Результаты исследования.** При использовании пожарного ствола вблизи открытого пламени рекомендуется сначала работать струёй воды с углом распыления до  $120^\circ$  или применить теплозащитный водяной экран. Это способствует не только снижению температуры, но и дымоосаждению.

После этого приступают к тушению пожара компактной струёй воды, сокращая площадь горения путём круговых движений от края к центру.

Для сокращения времени ликвидации аварии и уменьшения проливов воды, когда пламенное горение почти прекращается при температуре менее  $250^\circ\text{C}$ , приступают к тушению пожара воздушно-механической пеной до снижения температуры менее  $100^\circ\text{C}$

Для повышения эффективности тушения пожара подача воды должна продолжаться до тех пор, пока не будет ликвидировано пламенное горение. После этого необходимо подавать пену до снижения температуры и прекращения тления горючих материалов. Время комбинированного тушения пожара сначала водой, а затем пеной будет зависеть от того, насколько больше заданная интенсивность подачи средства пожаротушения отличается от огнетушащей её интенсивности и от времени с начала тушения пожара. Данные о времени тушения пожара водой или пеной при различной интенсивности их подачи приведены в таблице.

Расчётные данные времени тушения пожара при различном расходе воды

$G$ , кг/с	$g$ , кг/м <sup>2</sup>	$S$ , м <sup>2</sup>	$T_0$ , °C	$T_m$ , °C	$T_2$ , °C	$\tau_2 - \tau_1$ , мин
2	20	15	20	1000	100	21
4	20	15	20	1000	100	11
6	20	15	20	1000	100	7
8	20	15	20	1000	100	5

Полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволили разработать метод расчёта комбинированного тушения пожара водой, а затем пеной в помещении.

#### Исходные данные для расчёта:

$T_0$  – начальная температура в помещении до пожара, °C;

$g$  – пожарная нагрузка, кг/м<sup>2</sup>;

$\tau_1$  – время с начала тушения пожара, мин;

$\Delta\tau$  – время тушения пожара водой или пеной, мин;

$T_2$  – конечная температура при тушении водой, °C;

$T_3$  – конечная температура при тушении пеной, °C;

$S$  – площадь горения, м<sup>2</sup>.

### Порядок расчёта комбинированного тушения пожара водой и пеной в помещении

- Определяем по формуле максимальную температуру в очаге пожара по заданной пожарной нагрузке:

$$T_m = T_0 + \frac{1300g}{7 + g}, \quad (1)$$

где  $T_m$  – максимальная температура, °С.

- Находим время повышения температуры до максимальной:

$$\tau_m = 9\sqrt{g}. \quad (2)$$

- Определяем температуру в очаге горения к началу тушения пожара:

$$T_1 = T_0 + (T_m - T_0) \left( \frac{\tau_1}{\tau_m} \right)^4 \exp \left[ 4 \left( 1 - \frac{\tau_1}{\tau_m} \right) \right]. \quad (3)$$

При отсутствии данных о начале тушения пожара принимаем  $T_1 = T_m$ .

- Находим необходимую интенсивность  $G_B$ , кг/с, тушения пожара водой до температуры  $T_2 = 250$  °С:

$$G_B = \frac{Sg}{80\Delta\tau} \left( \frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_0} - 1 \right). \quad (4)$$

- Определяем при  $2\Delta\tau$  необходимую интенсивность  $G_B$ , кг/с, тушения пожара только водой до температуры  $T_3 = 100$  °С по формуле

$$G_B = \frac{Sg}{160\Delta\tau} \left( \frac{T_1 - T_3}{T_3 - T_0} - 1 \right). \quad (5)$$

- Находим необходимую интенсивность подачи воды в пену при дальнейшем тушении пожара:

$$G_B = \frac{Sg}{80\Delta\tau} \left( \frac{T_2 - T_3}{T_3 - T_0} - 1 \right). \quad (6)$$

- Определяем интенсивность подачи пены  $Q$ , м<sup>3</sup>/с, по формуле

$$Q = KG / \rho, \quad (7)$$

где  $K$  – кратность пены;  
 $G$  – интенсивность подачи воды, кг/с;  
 $\rho$  – плотность пены, кг/м<sup>3</sup>.

При работе пожарного ствола расход воды выбираем равным 2, 4, 6, 8 кг/с. Для таких расходов в таблице приведены расчётные данные времени тушения пожара, полученные по формуле

$$\Delta\tau = \left( \frac{T_m - T_0}{T_2 - T_0} - 1 \right) Sg / 80G \quad (8)$$

при заданных площади очага пожара, максимальной температуре в зоне горения и пожарной нагрузке.

Очевидно, при увеличении площади очага пожара в два раза и время тушения увеличится в 2 раза. И в том и в другом случае при такой большой площади очага необходимо применять распылённую струю или тушить пожар сплошной струёй круговыми движениями от края к центру.

**Пример.** Выполнить расчёты параметров комбинированного тушения пожара водой и пеной в помещении.

Исходные данные для расчета:

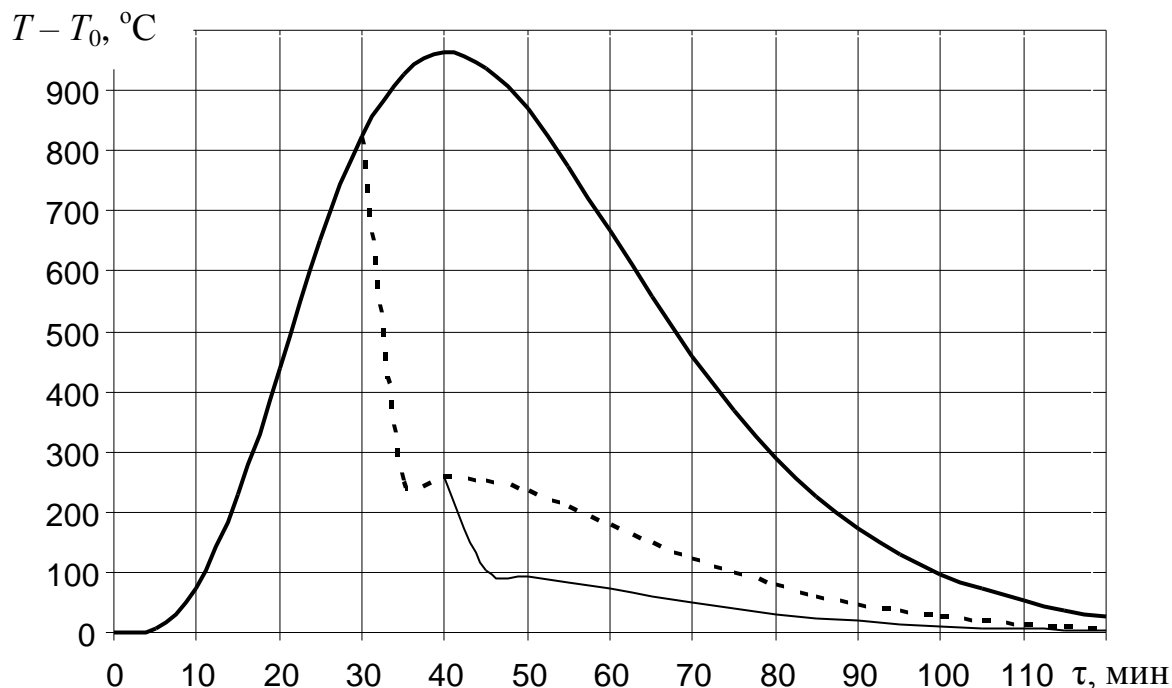
$T_0 = 20$  °С;  $T_2 = 250$  °С;  $T_3 = 100$  °С;  $g = 20$  кг/м<sup>2</sup>;  $S = 15$  м<sup>2</sup>;  $\tau_1 = 30$  мин;  
 $\Delta\tau = 5$  мин;  $K = 40$ .

#### Порядок расчёта

- Определяем по формуле (1) максимальную температуру в очаге пожара по заданной пожарной нагрузке:  $T_m = 983$  °С.
- Находим время наступления максимальной температуры по формуле (2):  $\tau_m = 40$  мин.
- Определяем по формуле (3) температуру в очаге горения к началу тушения пожара:  $T_1 = 848$  °С.
- Находим по формуле (4) необходимую интенсивность тушения пожара водой до температуры 250 °С:  $G_b = 2$  кг/с.
- Находим по формуле (6) необходимую интенсивность дальнейшего тушения пожара пеной с расходом воды  $G_b = 1,4$  кг/с.
- Определяем необходимую интенсивность тушения пожара только водой до температуры 100 °С по формуле (5):  $G_b = 3,5$  кг/с.
- Определяем расход пены по формуле (7):  $Q = 0,06$  м<sup>3</sup>/с.

Таким образом, комбинированное тушение пожара водой и пеной позволяет в течение 10 мин сначала ликвидировать пламенное горение, а затем снизить температуру до 100 °С при пожарной нагрузке, как в примере, 20 кг/м<sup>2</sup>

и при площади очага  $15 \text{ м}^2$ . В то же время, снижая температуру в очаге пожара до прекращения пламенного горения и переходя к тушению пеной до температуры  $100 \text{ °C}$ , можно уменьшить расход воды в пене. На рисунке представлены результаты расчёта развития пожара и комбинированного его тушения в помещении диспергированной водой, а затем воздушно-механической пеной кратностью  $K = 40$  при пожарной нагрузке  $20 \text{ кг/м}^2$ .



Изменение во времени температуры в очаге пожара:

жирная линия – при развитии пожара; прерывистая линия – при тушении диспергированной водой с интенсивностью  $2 \text{ кг/с}$ ; тонкая линия – при тушении воздушно-механической пеной с интенсивностью подачи воды  $1,4 \text{ кг/с}$

Анализ результатов расчёта показывает, что при тушении пожара только водой общее её количество больше, чем при дальнейшей ликвидации аварии пеной.

### Выводы

На основании теоретических и экспериментальных исследований обоснован и разработан метод расчёта параметров комбинированного тушения пожара в помещении сначала диспергированной водой, а затем воздушно-механической пеной в зависимости от интенсивности и продолжительности подачи огнетушащего вещества в зону горения.

## Список литературы / References

1. Разработка высокоэффективного универсального огнетушителя на основе генерации струй тонкораспыленных огнетушащих веществ / А.В.Карпышев, А.Л. Душкин, Н.Н. Рязанцев, А.А. Афанасьев, В.В. Матушкин, М.Д. Сигаль // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – Т. 16, № 2. – С. 69 – 74.

Karpyshev, A.V., Dushkin, A.L., Ryazantsev, N.N., Afanas'yev, A.A., Matushkin, V.V., Sigal', M.D. *Razrabotka vysokoeffektivnogo universal'nogo ognetushitelya na osnove generatsii struy tonkoraspylyennykh ognetushashchikh veshchestv* [Working-out a high-performance universal fire extinguisher on the basis of stream generation of atomized fire-fighting substances]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – Fire- and explosion safety, 2007, vol. 16, no. 2, pp. 69 – 74.

2. Семко, А.Н. Тушение газовых факелов высокоскоростными импульсными струями жидкости / А.Н. Семко, М.В. Бескровная, С.А. Виноградов, И.Н. Грицына // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 128 – 136.

Semko, A.N., Beskrovnaya, M.V., Vinogradov, S.A., Gritsyna, I.N. *Tusheniye gazovykh fakelov vysokoskorostnymi impul'snymi struyami zhidkosti* [Fighting the gas flames with high-speed pulse liquid jets]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2013, issue 50, pp. 128 – 136.

3. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

Puzach, S.V. *Metody raschyeta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach požarovzryvobezopasnosti* [Methods of calculation of the heat-mass exchange by a fire in a premise and their use by solving the practical fire-explosion safety problems]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Publ., 2005, 336 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.  
Дата поступления рукописи 28.01.2019

**Vladimir Grigoryevich Ageyev**, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru)

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-00;

**Aleksey Aleksandrovich Kostrubitskiy**, Minister, e-mail: [mchs-dnr@mail.ru](mailto:mchs-dnr@mail.ru)

The Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters

283050, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone (+38 062) 340-62-28;

**Igor Nikolayevich Zinchenko**, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: [zinstar@mail.ru](mailto:zinstar@mail.ru)

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

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

## SUBSTANTIATION AND CALCULATION OF PARAMETERS OF THE COMBINED FIGHTING OF FIRES WITH WATER AND FOAM

**Purpose.** Effectiveness increase of the combined fighting of the fire with water and foam in a premise by means of preliminary prognostication of the time of fighting.

**Methods.** Analytical and experimental investigations of fighting the fire with water and foam, adequacy of a mathematical model of the mechanism of flame suppression; calculation of parameters of the operation of a fire-hose barrel and the time of fighting the fire with water and foam.

**Results.** The water and foam combined method of fighting the fire based on manifestation of the mechanism of burn and smoldering termination by fire-fighting substances has been considered. The design formulae to determine the intensity of feeding water at first, and then foam and the time of fighting the fire have been obtained. The order of calculation has been stated, and an example of calculation of the parameters of the combined fighting the fire with water and foam in the process of outflow of the fire-extinguishing substance has been adduced.

**Scientific novelty.** Effectiveness increase of the combined fighting of the fire with water and foam by means of the worked out calculation method of prognostication of the necessary intensity of feeding the fire-extinguishing substances and of the time of fighting.

**Practical value.** The obtained results of the investigations allow heightening the effectiveness of the combined fighting of the fire with water and foam by means of the sequential operation of the fire-extinguishing substances.

**Keywords:** *premise; fire; fighting; fire-hose barrel; water; foam; intensity of feeding; calculation of parameters; flame temperature; fire load; combustion area; time of fighting.*

## УДК [622-057.1:614.895.5]:620.3

*Вадим Григорьевич Сынков, д-р техн. наук, науч. сотр.; e-mail: [vasyn41@mail.ru](mailto:vasyn41@mail.ru);*

*Татьяна Олеговна Мороз, инж.; e-mail: [tatiana.moroz@rambler.ru](mailto:tatiana.moroz@rambler.ru)*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-43*

## НАНОТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРО- И ВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ В ШАХТАХ

**Цель.** Обеспечение пожаро-, взрывобезопасности шахт при применении спецодежды шахтеров из синтетических волокон, к материалам которой добавлены металлические волокна, полученные на основе нанотехнологий.

**Методика.** Научное обобщение сведений по проблеме.

**Результаты.** Выделено шесть наиболее известных технологий: кручение в наковальнях Бриджмена, равноканальное угловое прессование, всесторонняя ковка, винтовая экструзия, реверсивная закрытая прошивка, пакетная гидроэкструзия.

**Научная новизна.** Перспектива широкого применения при изготовлении спецодежды для шахтеров из синтетических волокон, где доминирует роль поверхности раздела и сочетание характеристик «прочность-пластичность».

**Практическая значимость.** Технология пакетной гидроэкструзии микроволокон из нержавеющей стали для изготовления спецодежды шахтеров.

**Ключевые слова:** наноматериалы; интенсивные пластические деформации; нанопорошок; горное производство; нанокластеры.

**Постановка проблемы.** На шахтах Донбасса постоянно увеличивается глубина разрабатываемых угольных пластов. С увеличением глубины возрастает пылевыделение, так как породы становятся более сухими. Высокие концентрации метана и пыли в воздухе приводят к опасности взрыва газов и пыли в шахтах. Более половины шахт Донбасса относятся к третьей категории и сверхкатегорийным по метану. Добыча угля в этом регионе ведётся во всё более сложных горно-геологических условиях. Возрастает удельный вес глубоких угольных пластов, что сопровождается ростом метанообильности и опасности взрывов в шахтах.

Создание прочной и взрывобезопасной спецодежды для рабочих угольных шахт в значительной степени тормозилось сильной электризуемостью тканей из полимерных волокон, с помощью которых, требования к механическим свойствам, отвечающим условиям труда на конкретных рабочих местах, могли бы быть удовлетворены. Помимо этого, концентрация полиэфирных волокон в тканях приводит к накоплению статического электричества, что небезопасно в условиях высокой концентрации метана в шахтах, поскольку может привести к взрывам и пожарам.

Эффективным направлением снижения электризуемости полиэфирных тканей и увеличения износостойкости спецодежды может стать введение в эти

материалы металлических волокон микронных размеров, созданных на основе нанотехнологий. Подобное направление быстро развивается в США, Японии, ФРГ, Бельгии, а также успешно опробовано в тканях, используемых взрывоопасными производствами химической промышленности.

Ткани, созданные на основе полиэфирных волокон, имеют удельное поверхностное электрическое сопротивление  $10^{11} \dots 10^{12}$  Ом, что примерно в 1000 раз превышает допустимый уровень, установленный для спецодежды горнорабочих. Такие ткани сильно электризуются, накапливаемые заряды превышают 2,5...3,0 кВ и могут стать причиной взрывов и возгораний. Тем более эти ткани не могут рекомендоваться взрывникам и персоналу складов ВВ.

Условно принято, что к наноматериалам относят кристаллические тела и кластеры с размером структурных единиц менее 100 нм ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ).

В последние годы использование наноматериалов получило развитие благодаря применению во многих областях: электронике, авиации и космонавтике, химии и машиностроении и др. Наноматериалы имеют большую удельную площадь поверхности, ускоряющую взаимодействие между наночастицами и средой, в которой они размещены. Это в миллионы раз ускоряет химические и биохимические реакции; разложение воды на водород и кислород в присутствии  $\text{TiO}_2$ ; наночастицы позволяют отсеять бактерии или поглотить примеси или токсины. Проявляется доминирующая роль поверхностей раздела, что помогает создавать энергосберегающие лазеры и светоизлучающие элементы на базе полупроводников. Углеродные нанотрубки обеспечивают прочность конструкций, в 10 раз превышающую аналогичные из стали при существенно меньшей массе [1, 2].

**Цель исследований.** Обеспечение пожаро-, взрывобезопасности шахт при применении спецодежды из синтетических волокон, к материалам которой добавлены металлические волокна, полученные на основе нанотехнологий.

**Анализ последних исследований.** Выбрано шесть наиболее известных технологий: кручение в наковальнях Бриджмена, равноканальное угловое прессование, всесторонняя ковка, винтовая экструзия, реверсивная закрытая прошивка, пакетная гидроэкструзия.

Наноматериалы по размерам составляющих структурных единиц и количеству атомов в них условно делятся на нанокластеры и нанокристаллы.

Нанокластеры – это структуры наноразмеров, образованные слабыми Ван-дер-Ваальсовыми или водородными связями. Они содержат от 3 до 22000 атомов, в основном поверхностных. Но в гигантских кластерах бывает от 4 до 18 внутренних слоев. Для кластеров, содержащих менее 300 атомов, наиболее стабильной является икосаэдрическая форма (20 треугольных граней).

Нанокристаллы – это большая группа наноматериалов в виде консолидированных тел, получаемых тремя видами технологий:

- порошковой,
- контролируемой кристаллизацией из аморфного состояния,

- интенсивными пластическими деформациями.

Для получения нанопорошков применяют в основном две технологии:

- метод термического испарения под высокоэнергетическим воздействием с последующей конденсацией из паровой фазы;
- высокоскоростную закалку из расплавленного состояния на массивных быстровращающихся барабанах.

С помощью этих методов получают тонкую фольгу или проволоку в аморфном состоянии, а затем контролируемой кристаллизацией переводят ее в наносостояние.

Большой сектор технологий получения наноматериалов представлен интенсивными пластическими деформациями. Два условия достижения наносостояния:

- измельчение зерен должно проходить при простом сдвиге и большой гидростатической сжимающей компоненте;
- форма заготовки не должна изменяться в процессе многократного повторения единичного акта процесса деформации.

Среди большого количества технологий получения наноматериалов назовем шесть наиболее известных.

1. Кручение в наковальнях Бриджмена. Обработка образца в форме таблетки толщиной 0,5...1 мм и диаметром 10 мм осуществляется после ее сжатия между наковальнями до давлений  $(10...20) \cdot 10^8$  Па и последующего кручения под нагрузкой верхней наковальни. Состояние простого сдвига достигается легко, но из-за малого объема образца круг применения такой технологии очень ограничен.

2. Равноканальное угловое прессование. Схема предложена в 80-х годах XX в. в Минске профессором Сегалом, им получена основная группа патентов [3]. Этот процесс состоит в прессовании заготовки прямоугольного сечения через канал угловой формы. Угловая форма канала обеспечивает простой сдвиг при прохождении заготовкой зоны стыка вертикальной и горизонтальной частей канала. Недостатком способа считается искажение торцов после каждого выдавливания; много материала уходит в отходы.

3. Всесторонняя ковка в закрытых калибрах, предложенная в Уральском авиационном институте. Используют при обработке больших плит из титана для авиадвигателей, турбинных дисков и других массивных деталей. Схема позволяет создавать в заготовке состояние простого сдвига и контролировать деформированное состояние на всех этапах процесса, однако большая масса заготовки и градиенты давления и температуры на разных этапах усложняют управление качеством продукта.

4. Винтовая экструзия. Заготовка скручивается и раскручивается при выдавливании через винтовой канал, оставляя форму заготовки неизменной. Основным препятствием широкого использования этой схемы является низкая стойкость штампа за счет высокой концентрации напряжений в винтовом канале калибра. Были начаты работы по использованию обработанных

титановых заготовок для деталей эндопротезов конечностей и элементов суставов.

5. Реверсивная закрытая прошивка снимает концентрацию напряжений в калибре за счет использования схемы закрытой прошивки с соосными пуансонами. Центральный пуансон прошивает цилиндрическую заготовку до формирования стакана, после чего внешний пуансон превращает стакан в первоначальный цилиндр. Схема проста, достаточно нескольких циклов (3...4) для достижения наносостояния, однако отмечается градиент размеров нанокристаллов по объему заготовки.

6. Метод пакетной гидроэкструзии проволочных элементов в изолирующем чехле [4]. Метод был предложен в базовой лаборатории ДонФТИ, чтобы повысить эффективность твердофазного топлива разгонных блоков ракеты «Буран» за счет замены в составе компонентов полимерных волокон, являющихся балластом, на упрочненные пирофорные волокна из металлов. Предварительные расчеты показали, что может быть прирост энергетики и динамических характеристик ракеты.

**Результаты исследования.** Отправным пунктом послужила известная схема получения сверхпроводников из сплава ниобий-титан. Согласно этой схеме набор проволочных элементов, покрытых медью электролитическим способом, собирают в чехол и выдавливают через набор фильер сначала гидропрессованием, а затем волочением. Чтобы получить этим способом волокна микронных размеров, необходима операция растворения меди в азотной кислоте, что дорого. Разработан способ разделения волокон специальным составом, удаляемым с поверхности моющими средствами.

Вышеизложенные методики позволили получить металлические волокна, которые использовали при создании ткани, в которой синтетические волокна переплетены с металлическими. Из данной ткани изготовлена опытная партия спецодежды. На угольном предприятии проведены опытно-промышленные испытания средств индивидуальной защиты, содержащих металлические волокна с размером кристаллитов 40...300 нм, что по размерной шкале относит их к наноматериалам [1, 2].

На опытной базе ДонФТИ создана инфраструктура опытно-промышленного производства волокон, в которую входят устройства для подготовки пакетных заготовок к прессованию, перемотки и резки проволочной заготовки, удаления оболочки, ультразвуковой очистки поверхности волокон, испытания их механических свойств при нагрузках, равных нескольким десяткам граммов, с записью процесса деформирования волокон.

На этой же базе созданы участки для получения из волокон войлоков, вакуумного спекания их в маты, прокатки матов в фильтровальные пластины и формирования из них фильтровальных элементов респираторов для защиты органов дыхания шахтеров от пыли. Испытывали фильтровальные элементы респираторов путем контроля проскоков пыли с помощью калиброванных медицинских фильтров.

Часть работ, связанных с использованием микроволокон в производстве спецодежды шахтеров, ДонФТИ проводил совместно с институтом полимерных волокон, где на экспериментальном участке обрабатывали режимы получения пряжи, композиционной нити с разной массовой долей металла, режимов получения тканых полотен для спецодежды.

Многообразие техногенных факторов горного производства часто приводит к превышению порога безопасности работающих. Рассмотрим это на примере электростатической искробезопасности спецодежды шахтеров.

Согласно требованиям ГОСТ 12.1.018-86 электростатическую искробезопасность должны обеспечивать условия, ограничивающие максимально допустимое значение потенциала электризации, определяемое из соотношения

$$U_{\max} \leq \sqrt{\frac{2W_{\min} k_1}{C k_2}},$$

где  $W_{\min}$  – минимальная энергия зажигания метана, Дж;  $W = 0,28$  мДж;

$C$  – электрическая емкость рабочего;  $C = 150 \dots 300$  пФ;

$k_1$  – коэффициент безопасности;  $k_1 = 0,4$ ;

$k_2$  – коэффициент, зависящий от концентрации метана, температуры, скорости среды, степени катализации метановоздушной смеси пылевыми аэрозолями;  $k_2 = 0,5 \dots 1,5$ .

Таким образом, при разных возможных сочетаниях этих характеристик, минимально допустимое значение потенциала электризации спецодежды можно варьировать в диапазоне 700...1700 В.

С другой стороны, необходимо отметить, что время воспламенения смесей метана в диапазоне пожароопасных концентраций зависит от температуры в локальном объеме. При 650 °С оно равно 10 с, при 1000 °С 1 с, при 1500 °С 0,1 с, поэтому определенное значение имеет ток разряда, его тепловой эффект и время релаксации заряда до безопасного значения.

Нужно помнить, что при электризации материала спецодежды непрерывно происходят два процесса: накопление зарядов и их релаксация. Процесс накопления зарядов зависит только от механизма разделения зарядов по их знаку; он стимулируется движением отдельных участков спецодежды относительно друг друга и окружающих предметов при работе и ходьбе. Накопленный одеждой электрический потенциал зависит от сырьевого состава ткани, ее строения, природы материалов, с которыми спецодежда входит в соприкосновение, степени приближения работника к источникам электромагнитных полей и др. Процесс релаксации зарядов (уменьшение накопленного тканью электрического потенциала) зависит от электропроводящих свойств материала и способности элементов его структуры

создавать вокруг себя зоны ионной проводимости, облегчающей движение зарядов через диэлектрические участки ткани или в окружающую среду.

Вполне понятно, что определенную роль в облегчении или торможении этих процессов играют характеристики окружающей среды (температура, влажность, запыленность, склонность к образованию заряженных аэрозолей, турбулентность воздушных потоков и др.).

Поэтому при тестировании текстильных материалов для спецодежды горнорабочих на степень электризации и искробезопасность должны контролироваться, как минимум, три электрофизические характеристики: максимально возможный для данного материала потенциал электризации  $U$ , соответствующий конкретным условиям эксплуатации (влажности, запыленности, температуре, скорости струи проветривания), время ее релаксации до безопасного значения  $\tau$ , максимальное значение тока разрядки при стекании заряда  $I_{\max}$ . Для экспрессного контроля пригодности материала можно использовать удельное поверхностное электросопротивление  $\rho$ , но только в том случае, если предварительно установлена надежная зависимость  $\rho = f(U_{\max}, I_{\max}, \tau)$  для конкретных условий эксплуатации [4].

В таблице приведены результаты измерений потенциалов электризации спецодежды из волокон различной природы, выполненных американской фирмой «Ричел Текстайл корпорейшн» [5].

Потенциалы электризации спецодежды (влажность 25 %)

Испытуемый материал спецодежды	Материал нижней одежды	Потенциал электризации, В
Хлопчатобумажная ткань	Хлопчатобумажная ткань	3300
То же	Полиэфирно-хлопковая ткань	3600
Полиэфирно-хлопковая ткань	То же	2000
Полиэфирно-хлопковая ткань + 1% металлического волокна	«	380
Ткань из волокна «номекс»	«	4000
Ткань из волокна «номекс» + 1% металлического волокна	«	120

Введение в штапельную нить металлических микроволокон позволяет наиболее полно использовать оба механизма релаксации зарядов (электронный и ионный). Такой прием не только повышает электропроводность ткани за счет создания проводящего кластера, но и ионизирует пространство в зоне зарядов за счет концентрации электростатического поля на концах коротких отрезков металлического волокна, что способствует их релаксации по механизму коронирования.

Представленная концепция контроля электрофизических характеристик тканых материалов может послужить основой разработки комплексных методов производства и средств сертификации тканей для спецодежды работников угольных шахт, опасных по выбросам метана. Ткани, содержащие металлические волокна, обеспечивают более эффективную защиту шахтеров от статического электричества.

**Выводы.** Таким образом, проведенными исследованиями доказана возможность получения износостойкой полиэфирно-хлопковой ткани с вложением металлического волокна для изготовления спецодежды горнорабочих угольных шахт. Введение в ткань, имеющую удельное электрическое сопротивление  $\rho \sim 10^{11}$  Ом, 5 % металлического волокна снижает показатель электрического сопротивления до  $\rho \sim 10^2$  Ом, что по механическим и гигиеническим характеристикам удовлетворяет требованиям по накоплению статического электричества на ее поверхности, действующим в угольной промышленности.

При тестировании материалов для спецодежды горнорабочих на степень электризации и искробезопасность необходимо контролировать как минимум три характеристики: потенциал электризации  $U$ , время ее релаксации до безопасного значения  $t$ , максимальный ток разрядки  $I_{\max}$ .

#### Список литературы / References

1. Валиев, Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией / Р.З. Валиев, И.В. Александров. – М.: Логос, 2000. – 272 с.

Valiyev, R.Z., Aleksandrov, I.V. *Nanostrukturnyye materialy, poluchennyye intensivnoy plasticheskoy deformatsiyey* [Nanostructural materials obtained as a result of the intensive plastic deformation]. Moscow, Logos Publ., 2000, 272 p.

2. Сынков, В.Г. Регенерируемые фильтроэлементы шахтных респираторов на основе спеченных металлических микроволокон // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч.тр. – Донецк: ИФГП НАНУ, 2004. – Вып.7. – С. 204 – 207.

Synkov, V.G. *Regeneriruyemyye fil'troelementy shakhtnykh respiratorov na osnove spechennykh metallicheskih mikrovolon* [Reactivated filter elements of mine breathing apparatus on the basis of sintered metallic microfibres]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva: sb. nauch. tr.* [Physicotechnical problems of the mining practice: collected scientific papers]. Donetsk, IFGP NANU, 2004, issue 7, pp. 204 – 207.

3. Segal, V.M. Slip line solutions, deformation mode and loading history during equal channel angular extrusion. *Materials Science and Engineering A*. 2003, vol. 345, nos 1-2, pp. 36 – 46.

4. Алексеев, А.Д. Электризуемость спецодежды шахтеров и взрывобезопасность / А.Д. Алексеев, В.Г. Сынков, Л.Д. Транковская // Уголь Украины. – 2003. – №11. – С. 46 – 48.

Alekseyev, A.D., Synkov, V.G., Trankovskaya, L.D. *Elektrizuyemost' spetsodezhdy shakhtyrov i vzryvobezopasnost'* [Electrifiableness of working clothes of mine workers and explosion safety]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2003, no. 11, pp. 46 – 48.

5. Лефевр, И. Металлическое волокно «Бекинокс» как решение проблемы получения текстильных изделий с электропроводящими и антистатическими свойствами в целях безопасности / И. Лефевр, Г. Тиммерман. – Вевегем, Бельгия: Бельгийский НТЦ текстильной промышленности «Сентексбел», 2008. – 36 с.

Lefevre, I., Timmermann, G. *Metallicheskoye volokno "Bekinoks" kak resheniye problemy polucheniya tekstil'nykh izdeliy s elektroprovodyashchimi i antistaticheskimi svoystvami v tselyakh bezopasnosti* [The "Bekinox" metallic fibre as solution of the problem of generation of textile articles with current-conducting and antistatic properties in the interests of safety]. Zvevegem, Belgium: *Centexbel-Belgium Textile Research Centre*, 2008, 36 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.  
Дата поступления рукописи 06.02.2019

Vadim Grigoryevich Synkov, Dr. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: [vasyn41@mail.ru](mailto:vasyn41@mail.ru);  
Tatyana Olegovna Moroz, engineer; e-mail: [tatiana.moroz@rambler.ru](mailto:tatiana.moroz@rambler.ru)  
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DPR  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-43

## NANOTECHNOLOGIES FOR GUARANTEEING THE FIRE- AND EXPLOSION SAFETY IN MINES

**Purpose.** Guaranteeing the fire- and explosion safety of the mines by the use of working clothes of mine workers from synthetic fibres to which materials the metallic fibres obtained on the basis of the nanotechnologies are added.

**Methods.** Scientific generalization of information on the problem.

**Results.** Six most known technologies have been assigned: torsion in Bridgman anvils, equal channel angular pressing, all-round forging, screw-shaped extrusion, reversible closed stitching, package hydrostatic extrusion.

**Scientific novelty.** Perspective of the wide application by production of the working clothes for the mine workers from synthetic fibres where the role of an interfacial area and combination of the characteristics "strength-plasticity" dominate.

**Practical value.** Technology of the package hydrostatic extrusion of microfibres from a stainless steel for production of the working clothes of the mine workers.

**Keywords:** *nanomaterials; intensive plastic deformations; nanopowder; mining practice; nanoclusters.*

УДК 614.841.245:621.313.012.5

*Владлен Валерьевич Гуржий, ст. науч. сотр.; e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@mail.ru);*

*Евгений Олегович Зинченко, мл. науч. сотр.; e-mail: [fire-408@yandex.com](mailto:fire-408@yandex.com)*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-80*

## ИСКРОВЫЕ РАЗРЯДЫ В КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

**Цель.** Установление аварийного режима работы по оплавлениям поверхностей контактных соединений, изъятых с места пожара.

**Методы.** Инструментальные исследования контактных соединений со следами оплавлений, морфологический анализ.

**Результаты.** Установлены характерные признаки большого переходного сопротивления в контактных соединениях электроустановок.

**Научная новизна.** Дифференциация аварийного режима работы – большое переходное сопротивление при искровом и безыскровом режимах работы; представлены характерные признаки искрового режима работы.

**Практическая значимость.** Результаты исследований позволяют определить зависимость между аварийными режимами работы электроустановок и возникновением пожара.

**Ключевые слова:** *аварийные режимы работы; большое переходное сопротивление; контактное соединение; искровой режим; электроустановка; оплавления; морфологический анализ.*

**Постановка проблемы.** С автоматизацией различных отраслей промышленности, сельского хозяйства и быта непосредственно связано увеличение уровня пожарной опасности.

По статистическим данным [1], за 2017 г. в Донецкой Народной Республике произошло 8553 пожара, одной из основных причин которых стало нарушение правил устройства и эксплуатации электроустановок (29,3 %), при этом наблюдается тенденция роста количества таких пожаров по сравнению с 2016 г. (5513 пожаров, среди которых по причине нарушения правил устройства и эксплуатации электроустановок произошло 27,2 % пожаров соответственно) и 2015 г. (4898 пожара, среди которых из-за нарушения правил устройства и эксплуатации электроустановок произошло 24,1 % пожаров соответственно).

С физической точки зрения можно выделить три основных пожароопасных процесса, характерных для аварийных режимов работы электрооборудования:

- перегрузка тока;
- короткое замыкание;
- большое переходное сопротивление.

Указанные процессы сопровождаются тепловыми эффектами, которые при определенных условиях могут стать источниками зажигания большинства горючих материалов или вызвать новые повреждения в элементах электросети. Аварийные процессы, происходящие в электросети, формируют на ее

элементах закономерную совокупность признаков (перегорания, оплавления токоведущих элементов и т.п.).

Согласно результатам исследований (см. таблицу) одним из наиболее пожароопасных аварийных режимов является большое переходное сопротивление в контактных соединениях.

Распределение пожаров в ДНР из-за аварийных режимов работы в электросети

Аварийный режим работы	Доля пожаров, %		
	2015 г.	2016 г.	2017 г.
Короткое замыкание	71,43	51,47	49,13
<b>Большое переходное сопротивление</b>	<b>28,57</b>	<b>26,47</b>	<b>26,86</b>
Перегрузка тока	0	22,06	24,01

Большое переходное сопротивление возникает в контактных соединениях при переходе электрического тока с одного провода на другой в результате [2]:

- недостаточной площади контакта в соединении;
- несоответствия применяемых материалов и комплектующих условиям эксплуатации;
- недостаточного контакта в соединении;
- больших вибрационных нагрузок электроустановки;
- старения изоляционных материалов проводов и кабелей;
- заводских дефектов токоведущих частей электроустановок;
- повышенной влажности и агрессивности среды.

Более пожароопасными становятся переходные сопротивления при длительных устойчивых тепловых режимах в контактных соединениях, что приводят к термическому разрушению изоляции и защитных оболочек электроустановок.

Источники зажигания – нагретые провода, электрическая дуга, раскаленные или горящие частицы металла; происходит оплавление изоляции проводов и контактных соединений.

Пожарная опасность электрического соединения в режиме большого переходного сопротивления проявляется при номинальных значениях электрического тока или при значениях тока меньше номинального, и, как следствие, даже правильно выбранные аппараты защиты не сработают. При этом будет происходить нагревание аварийного участка за счет увеличения переходного сопротивления.

**Анализ последних исследований.** В работах [3 – 5] представлены характерные признаки большого переходного сопротивления при визуальном осмотре, однако результаты визуального осмотра позволяют сделать вывод о наличии большого переходного сопротивления в контактном соединении лишь в случаях больших разрушений и температурных воздействий. В большинстве случаев следы большого переходного сопротивления не видны невооруженным

глазом и их выявление и фиксация представляют для экспертов нелегкую задачу, что может повлиять на выводы о причинах пожара. В данной статье изложены результаты морфологического анализа оплавлений контактных соединений, которые позволяют повысить достоверность вывода о наличии большого переходного сопротивления в соединениях.

**Результаты исследований.** Основная задача при морфологическом анализе – определение причин оплавлений контактных соединений и разрушений изоляции подходящих проводов с применением портативного цифрового микроскопа Levenhuk DTS 500 LCD.

При изучении структуры поверхности образца с целью определения наличия (отсутствия) на нем следов, характерных для большого переходного сопротивления, рекомендовано проведение исследования поверхности одного и того же участка при различных увеличениях [4].

Большое переходное сопротивление, с точки зрения пожарной опасности, разделяют на два вида: локальное нагревание и искрение, которые встречаются отдельно и одновременно в одной точке цепи в зависимости от внешних условий (температуры, влажности, агрессивности среды), силы тока и других факторов (вибрации и т.д.).

Представим характерные признаки большого переходного сопротивления в контактных соединениях при искровом режиме работы.

В случае, если площадь контакта меньше некоторого критического значения, в зоне большого переходного сопротивления начинается прохождение многочисленных электрических разрядов. Именно этот случай наиболее пожароопасен. При искровом режиме большого переходного сопротивления под воздействием электрического поля промежуток между контактами ионизируют и при достаточном напряжении происходит разряд – электрическая искра, которая переходит в электрическую дугу с деформацией (износом) и оплавлением металла контактов.

Многочисленные микроразряды оставляют на контактных поверхностях следы электроэрозии в виде кратеров, оплавлений, вкраплений, каверн и т.д.

При исследовании жил медных проводов, подвергшихся искрению в момент замыкания (размыкания) цепи, были обнаружены дефекты поверхности в местах соприкосновения проводников. Эти дефекты представляли собой многочисленные кратеры, оставленные дуговыми разрядами на поверхности проводов. При этом горящие частицы металла могут разлетаться на ближайшие поверхности горючих материалов, приводя к их воспламенению.

На предоставленных для исследования жилах алюминиевых проводов, подвергшихся воздействию искрового режима, отчётливо видны кратеры, оставленные одиночными искрами на поверхности провода. В ряде участков кратеры наложились друг на друга, вследствие чего поверхность оплавления имеет вид каверн и неровностей, которые являются застывшими каплями расплавленного металла провода, подвергшегося воздействию искрения, и наблюдается значительный прожог поверхности жилы (рис. 1).

С места пожара для исследования предоставляли фрагменты электрических розеток и удлинителей. При разборке электроудлинителя на корпусе из полимерного материала обнаружены оплавления с прожогом поверхности.

В результате исследования коннекторных насадок на поверхности наблюдаются множественные микрооплавления, образованные в результате разлета горящих частиц металла провода, который подвергся воздействию искрового режима большого переходного сопротивления (рис. 2).

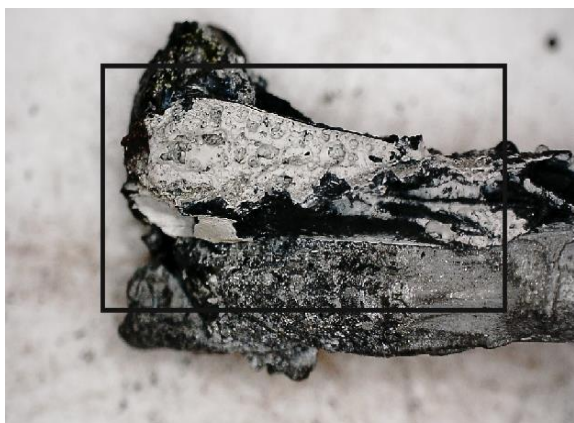


Рис. 1. Каверны и неровности на поверхности жилы алюминиевого провода в месте контактного соединения «в скрутку» с жилой алюминиевого провода при увеличении в 350 раз

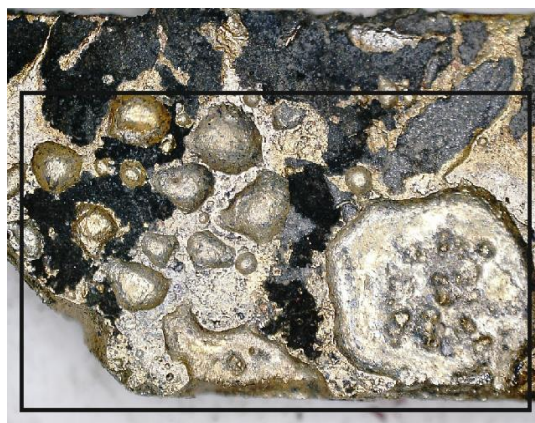


Рис. 2. Микрооплавления на поверхности коннекторной насадки при увеличении в 450 раз

При исследовании электрических розеток на поверхности штепсельного гнезда в месте контактного соединения со штифтом штепсельной вилки обнаружены капли застывшего металла и оплавления (рис. 3, 4).

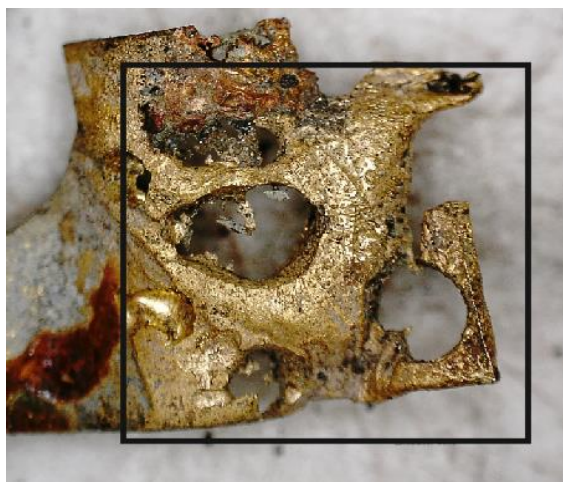


Рис. 3. Оплавление поверхности штепсельного гнезда электророзетки в месте контактного соединения при увеличении в 350 раз

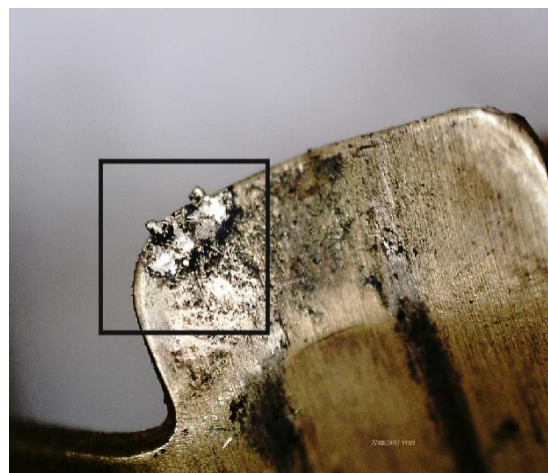


Рис. 4. Капли металла на поверхности штепсельного гнезда электроудлинителя в месте контактного соединения при увеличении в 400 раз

Характерные для искрового режима работы оплавления образовались при выгорании материала контактов под воздействием электрической дуги при недостаточной площади контакта – происходит дуговой износ контактов и как следствие оплавление металла контактов, который выбрасывается в окружающую среду в виде капель, брызг и наплывов металла.

## Выводы

1. Установлено, что вид контактного соединения не влияет на процесс образования характерных признаков на поверхности при искровом режиме работы:

- кратеры и впадины;
- каверны и неровности;
- микрооплавления;
- оплавления;
- наплывы, капли и вкрапления металла.

2. Морфологический анализ позволяет повысить достоверность результатов исследований при определении аварийных режимов работы в электросети.

## Список литературы / References

1. Официальный сайт МЧС ДНР [Электронный ресурс]. URL: <http://dnmchs.ru/> (дата обращения: 31.05.2018).

*Ofitsial'nyy sayt MChS DNR* [Official site of the Ministry of Emergency Situations (DPR)]. [Electronic resource]. Available at: <http://dnmchs.ru/> (accessed 31.05.2018).

2. Лебедев, К.Б. Следы больших переходных сопротивлений в электротехнических устройствах и их экспертное исследование / К.Б. Лебедев, И.Д. Чешко // Пожаровзрывобезопасность. – 2003. – № 6. – С. 32 – 38.

Lebedev, K.B., Cheshko, I.D. *Sledy bol'shikh perekhodnykh soprotivleniy v elektrotekhnicheskikh ustroystvakh i ikh ekspertnoye issledovaniye* [Traces of large transient resistances in electrical devices and their expert investigation]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2003, no. 6, pp. 32 – 38.

3. Гуржий, В.В. Признаки больших переходных сопротивлений в контактных соединениях / В.В. Гуржий, Е.О. Зинченко // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – № 2(55). – С. 74 – 79.

Gurzhiy, V.V., Zinchenko, Ye.O. *Priznaki bol'shikh perekhodnykh soprotivleniy v kontaktnykh soyedineniyakh* [Signs of large transient resistances in contact connections]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2017, no. 2(54), pp. 74 – 79.

4. Гуменюк, В.И. Диагностика и анализ больших переходных сопротивлений для обеспечения пожарной безопасности электрических контактов/ В.И. Гуменюк, А.М. Гренчук // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2014. – № 4(207). – С. 92 – 99.

Gumenyuk, V.I., Grenchuk, A.M. *Diagnostika i analiz bol'shikh perekhodnykh soprotivleniy dlya obespecheniya pozharnoy bezopasnosti elektricheskikh kontaktov* [Diagnostics and analysis of large transient resistances for ensuring the fire safety of electrical contacts]. *Nauchno-tekhnicheskiye vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta* [Scientific-technical bulletin of the St.-Petersburg State Polytechnic University]. 2014, no. 4(207), pp. 92 – 99.

5. Лебедев, К.Б. Выявление следов больших переходных сопротивлений после пожара на строящихся и эксплуатируемых объектах: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / К.Б. Лебедев. – СПб., 2002. – 174 с.

Lebedev, K.B. *Vyyavleniye sledov bol'shikh perekhodnykh soprotivleniy posle pozhara na stroyashchikhsya i ekspluatiruyemykh ob'yektakh*. Dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.26.03. [Revelation of traces of large transient resistances after a fire at objects under construction and exploited objects. Cand. tech. sci. diss.: 05.26.03.]. St.-Petersburg, 2002, 174 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 15.11.2018

*Vladelen Valeryevich Gurzhiy, senior scientific associate; e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@mail.ru);  
Yevgeny Olegovich Zinchenko, junior researcher; e-mail: [evgeniy.zinchenko@yandex.ru](mailto:evgeniy.zinchenko@yandex.ru)  
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DPR  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-80*

## SPARK DISCHARGES IN CONTACT CONNECTIONS OF ELECTRICAL INSTALLATIONS

**Purpose.** Ascertainment of the mode of operation conducive to accident on fusions of contact connection surfaces withdrawn from the site of a fire.

**Methods.** Instrumental investigations of the contact connections with traces of the fusions, morphological analysis.

**Results.** The characteristic signs of the large transient resistance have been ascertained in the contact connections of the electrical installations.

**Scientific novelty.** The differentiation of the mode of operation conducive to accident is the large transient resistance by the spark and sparkless modes of operation; the characteristic signs of the spark mode of operation are presented.

**Practical value.** The investigation results allow determining the dependence between the modes of operation conducive to accident of the electrical installations and origin of the fire.

**Keywords:** *modes of operation conducive to accident; large transient resistance; contact connection; spark mode of operation; electrical installation; fusions; morphological analysis.*

**УДК 622.822.3**

*Артем Алексеевич Диденко, науч. сотр.; e-mail: [didenartem89@gmail.com](mailto:didenartem89@gmail.com)*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-40*

## **ПРОТИВОПОЖАРНЫЕ РАЗРЫВЫ КАК СРЕДСТВО ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ**

**Цель.** Разработка метода расчета длины противопожарных разрывов.

**Методика** основана на использовании аналитических зависимостей для расчета параметров подземных экзогенных пожаров в проветриваемых горных выработках.

**Результаты.** Для локализации пожаров в выработках, не оборудованных противопожарным трубопроводом, или тех, в которых не обеспечен нормативный расход воды, предложено устраивать противопожарные разрывы – участки выработки, на которых отсутствует пожарная нагрузка и источники зажигания. В связи с тем, что пожар может возникнуть в любом месте горной выработки, противопожарные разрывы необходимо устраивать на всем ее протяжении через определенные промежутки, которые по длине должны быть меньше или равны дальности распространения пожара для данной выработки. В зависимости от количества и вида пожарной нагрузки, размещенной в выработке, её сечения, скорости вентиляционной струи рассчитывают: тепловую мощность пожара, длину зон горения и тления, дальность распространения пожара по выработке, температуру в зоне горения и на выходе из аварийного участка. На основе этих данных определяется длина противопожарных разрывов, устраиваемых для локализации подземного пожара, и промежутков между ними. Данный способ противопожарной защиты неприменим в конвейерных выработках и очистных участках.

**Научная новизна.** Впервые предложен способ противопожарной защиты горных выработок, не оборудованных противопожарным трубопроводом, с помощью обустройства в них противопожарных разрывов. Такой способ защиты может быть рекомендован при отсутствии противопожарного трубопровода для противопожарной защиты угольных шахт.

**Практическая значимость.** Обустройство противопожарных разрывов в выработках, не оборудованных противопожарным трубопроводом, позволит локализовать подземный пожар, исключив его распространение по всей выработке.

**Ключевые слова:** *противопожарный разрыв; подземный пожар; противопожарный трубопровод; проект противопожарной защиты шахты; горная выработка; локализация; пожарная нагрузка; температура.*

**Постановка проблемы.** Борьба с подземными пожарами представляет одну из наиболее сложных и актуальных проблем безопасности в угольной промышленности. Они особенно опасны тем, что возникают в ограниченном пространстве, в связи с чем быстро повышается до опасных значений температура воздуха, снижается концентрация в нем кислорода, что угрожает жизни горнорабочих и сохранению материальных ценностей.

Подземные выработки угольных шахт должны быть оборудованы противопожарным трубопроводом. Однако в настоящее время ряд угольных шахт имеет значительное количество выработок, в которых отсутствует противопожарное водоснабжение (обеспеченность горных выработок противопожарным трубопроводом находится на уровне 85 %).

Для каждой выработки, в которой отсутствует противопожарный трубопровод, командный состав ГВГСС решает тактическую задачу, цель которой – определить способ тушения пожара. Сравнивая скорость распространения пожара с имеющимися способами тушения практически во всех выработках, где отсутствует противопожарный трубопровод, приходим к выводу, что для локализации пожаров неизбежна изоляция сети горных выработок; это сопряжено с соответствующими материальными потерями.

В сложившейся ситуации необходимо принимать меры по восстановлению противопожарного водоснабжения шахт или предусматривать альтернативные мероприятия по противопожарной защите выработок, не оборудованных противопожарным трубопроводом.

Допустимо отсутствие противопожарного трубопровода в выработках, не имеющих горючих материалов, источников зажигания, повышенной запыленности и через которые нет необходимости прокладывать трубопроводы для транзита воды в другие выработки. При этом в проекте противопожарной защиты шахты должно быть приведено обоснование отсутствия трубопровода и предусмотрены меры оперативной подачи воды из других выработок.

Для того чтобы обезопасить выработки, не оборудованные противопожарным трубопроводом, или те, в которых не обеспечивается нормативный расход воды, предлагается обустраивать в них противопожарные разрывы.

Противопожарные разрывы – участки подземной выработки, на которых отсутствует пожарная нагрузка и источники зажигания. Их используют для предотвращения распространения подземного пожара.

На этих участках необходимо заменить деревянную крепь (или обработать огнезащитным составом), убрать трапы, кабели поместить в защитные короба, а длина этих участков и места их обустройства должны быть определены расчетом.

Однако адекватный метод расчета длины противопожарных разрывов до настоящего времени отсутствовал. Это связано со сложностью, нестационарностью происходящих при подземном пожаре в горных выработках массо- и тепломассообменных процессов, что в значительной степени затрудняет расчеты его параметров.

При этом следует учесть, что данный способ противопожарной защиты неприменим в конвейерных выработках и очистных участках.

**Цель исследований** – разработка метода расчета длины противопожарных разрывов.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работе [1] проведен обзор и анализ существующих нормативных документов, регламентирующих локализацию пожаров в горных выработках угольных шахт. Предложено защищать выработки, не оборудованные противопожарным трубопроводом, а также выработки длиной более 1000 м путем обустройства в них противопожарных разрывов.

В работе [2] определены технические требования к горным выработкам в зоне обустройства противопожарных разрывов. Представлен метод расчета параметров противопожарных разрывов, однако не учтен ряд факторов, например прогревание поверхности горной выработки за счет лучистого теплообмена.

В работе [3] показано, что совместное использование противопожарного разрыва и водяной завесы позволяет существенно уменьшить длину противопожарного разрыва в несколько раз.

В работах [4, 5] рассмотрено обустройство противопожарных разрывов и огнепреграждающих комплексов для локализации пожаров в горных выработках угольных шахт.

**Материалы и результаты исследований.** Для определения длины противопожарного разрыва, обустройстваемого для локализации пожара в выработке, необходимо рассчитать его параметры – тепловую мощность, длину зон горения и тления, дальность распространения по выработке, температуру в зоне горения и на выходе из аварийной выработки.

В состав горючих материалов в горной выработке могут входить:

- деревянная крепь;
- деревянные шпалы;
- силовые кабели.

Масса горючих материалов на единицу длины выработки  $m$ , кг/м:

$$m = m_{кр} + m_{к} + m_{ш}, \quad (1)$$

где  $m_{кр} = 72,6\sqrt{S} + 16,3n_p\sqrt{S}$  – пожарная нагрузка деревянной крепи, кг/м;

$S$  – площадь поперечного сечения выработки, м<sup>2</sup>;

$n_p$  – количество рам крепи на 1 м выработки;

$m_{к} = \sum_{\kappa=1}^N (0,0171S_{\kappa} + 1,0700)$  – суммарная масса горючего материала

гибких силовых кабелей на единицу длины выработки, кг/м;

$N$  – количество кабелей в выработке;

$S_{\kappa}$  – площадь сечения основной жилы  $\kappa$ -го кабеля ( $\kappa = 1 \dots N$ ), мм<sup>2</sup>;

$m_{ш}$  – масса шпал на единицу длины выработки, кг/м.

Объем воздуха, расходуемого на сгорание пожарной нагрузки на 1 м выработки, м<sup>3</sup>:

$$q_0 = \sum_{i=1}^Z m_i q_{уд,i}, \quad (2)$$

где  $m_i$  – пожарная нагрузка материалов  $i$ -го вида на участке выработки единичной длины, кг/м;

$q_{уд,i}$  – удельный расход воздуха на полное сгорание горючего материала  $i$ -го вида, м<sup>3</sup>/кг;

$z$  – количество видов пожарной нагрузки (горючих материалов) в аварийной выработке (древесина, кабели, и др.).

Тогда из уравнения (1) получаем

$$q_0 = q_{\text{уд,др}} (m_{\text{ш}} + 72,6\sqrt{S} + 16,3n_p\sqrt{S}) + q_{\text{уд,каб}} \sum_{k=1}^N (0,0171S_k + 1,0700), \quad (3)$$

где  $q_{\text{уд,др}}$  – удельный расход воздуха на полное сгорание древесины, м<sup>3</sup>/кг ( $q_{\text{уд,др}} = 4$  м<sup>3</sup>/кг);

$q_{\text{уд,каб}}$  – удельный расход воздуха на полное сгорание кабеля, м<sup>3</sup>/кг ( $q_{\text{уд,каб}} = 10$  м<sup>3</sup>/кг).

Периметр горячей поверхности деревянной крепи, м:

$$P_{\text{кр}} = 3,3\sqrt{S}. \quad (4)$$

Периметр горячей поверхности кабеля, м:

$$P_{\text{к}} = \sum_{k=1}^N (2 \cdot 10^{-6} \sqrt{S_k}). \quad (5)$$

Суммарный периметр горящих поверхностей в поперечном сечении выработки, м:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{кр}} + P_{\text{к}} + P_{\text{ш}}, \quad (6)$$

где  $P_{\text{ш}}$  – периметр горящих деревянных шпал, м.

Тепловая энергия, выделяющаяся при горении, на единицу длины выработки, кДж/м:

$$\Theta = \sum_{i=1}^Z Q_{\text{Hi}}^P m_i = Q_{\text{др}}^P (m_{\text{ш}} + 72,6\sqrt{S} + 16,3n_p\sqrt{S}) + Q_{\text{каб}}^P [\sum_{k=1}^N (0,0171S_k + 1,07)], \quad (7)$$

где  $Q_{\text{др}}^P$  – наименьшая теплота сгорания древесины, Дж/кг;  $Q_{\text{др}}^P = 17,5 \cdot 10^3$  Дж/кг;

$Q_{\text{каб}}^P$  – наименьшая теплота сгорания кабеля, Дж/кг;  $Q_{\text{каб}}^P = 25 \cdot 10^3$  Дж/кг.

Рассчитывают параметры пожара в выработке:

- предельную скорость распространения пожара, м/с

$$v_{\text{пр}} = (v_c S) / q_0, \quad (8)$$

где  $v_c$  – скорость вентиляционной струи в аварийной выработке, м/с;

- тепловую мощность пожара, кВт

$$W = v_{\text{пр}} \Theta_i; \quad (9)$$

- предельную температуру в очаге пожара  $T^*$ , °С

$$T^* = T_0 + 0,622 \frac{W}{v_c S}, \quad (10)$$

где  $T_0$  – температура в выработке до возникновения пожара, °С;

- предельную длину зоны горения, м

$$l_{\text{пр}} = v_{\text{пр}} \tau_{\text{Г}}, \quad (11)$$

где  $\tau_{\text{Г}}$  – время полного выгорания пожарной нагрузки, мин;

- дальность распространения пожара к моменту начала тушения, м

$$L_{\text{п}} = v_{\text{пр}} \left( \sqrt{210^2 + (20 + 20v_c)^2} - (20 + 20v_c) \right) + L_0, \quad (12)$$

где  $L_0$  – начальная длина зоны воспламенения, м;

- длину зоны тления, м

$$L_{\text{тл}} = v_{\text{пр}} \left( \sqrt{(210 - \tau_{\text{Г}})^2 + (20 + 20v_c)^2} - (20 + 20v_c) \right) + L_0; \quad (13)$$

- длину зоны горения, м

$$L_{\text{гор}} = L_{\text{п}} - L_{\text{тл}}. \quad (14)$$

Максимальную фактическую температуру в зоне горения, °С, определяют по формуле

$$T_{\text{max}} = T^* - (T^* - T_0) \exp\left(\frac{-2,821P_i}{\sqrt{S}}\right). \quad (15)$$

Коэффициент нагревания воздуха в зоне горения,  $\text{м}^{-1}$ , определяют по формуле

$$a_{\text{Г}} = \frac{0,01}{\sqrt{S}} \left( 1,21 + \frac{90,6}{v_c S} \right). \quad (16)$$

Расчетную температуру воздуха (пожарных газов) на выходе из аварийного участка  $T_{\text{вых}}$ , °С, определяют по формуле

$$T_{\text{вых}} = T_0 + (T_{\text{max}} - T_0) \exp[-\alpha_t(L - L_{\text{гор}} - L_{\text{тл}} - x_0)], \quad (17)$$

где  $L$  – длина аварийной выработки, м;

$x_0$  – расстояние от начала выработки до места возникновения пожара, м.

Принимаем длительность подготовки технических средств пожаротушения к спуску в шахту и монтажных работ  $\tau = 3,5$  ч (210 мин).

Определив параметры пожара по формулам (1) – (17), по формуле (18) вычисляем длину противопожарного разрыва  $L_p$ , м, то есть расстояние, на котором температура продуктов горения  $T_{\text{вых}}$ , °С, будет меньше температуры воспламенения пожарной нагрузки (древесины)  $T_{\text{восп}}$ , °С,  $T_{\text{вых}} < T_{\text{восп}} = 200$  °С, (см. рисунок):

$$L_p = L_{\text{гор}} + L_{\text{тл}} - \frac{1}{\alpha_t} \ln \left( \frac{T_{\text{восп}} - T_0}{T_{\text{max}} - T_0} \right). \quad (18)$$



#### Способ обустройства противопожарного разрыва в горной выработке

В связи с тем, что пожар может возникнуть в любом месте горной выработки, противопожарные разрывы необходимо устраивать на всем ее протяжении через определенные промежутки, которые по длине должны быть меньше или равны дальности распространения пожара для данной выработки  $L_{\text{п}}$ , м.

**Пример.** В вентиляционном штреке длиной  $L = 950$  м вследствие короткого замыкания в силовом кабеле произошел пожар.

Параметры штрека следующие: площадь поперечного сечения штрека  $S = 10,1$  м<sup>2</sup>, скорость вентиляционной струи  $v_c = 1,45$  м/с.

По длине выработки размещена пожарная нагрузка, в виде:

- деревянной крепи ( $n_p = 1$ );
- деревянных шпал (колея 600 мм,  $m_{\text{ш}} = 29,5$  кг/м,  $P_{\text{ш}} = 1,2$  м);
- одного силового кабеля с площадью сечения  $S_{\text{каб}} = 95$  мм<sup>2</sup> и одного сигнального кабеля с площадью сечения  $S_{\text{каб}} = 25$  мм<sup>2</sup>.

**Определить** длину противопожарного разрыва для локализации подземного пожара согласно условиям и найденным параметрам развития пожара. Принимаем, что подача воды в выработку невозможна, а пожар начался в самом начале выработки  $x_0 = 0$  м.

**Решение.** По формулам (1) – (17) находим параметры пожара, после чего решение задачи сводится к нахождению длины противопожарного разрыва  $L_p$ , м, по формуле (18):  $L_p \approx 195$  м.

В случае, если необходимо защитить выработку по всей длине, нужно обустраивать противопожарные разрывы на всем ее протяжении через определенные промежутки, которые по длине должны быть меньше или равны дальности распространения пожара для данной выработки  $L_n \approx 113$  м.

При этом в проекте противопожарной защиты шахты должно быть приведено обоснование отсутствия трубопровода и предусмотрены меры оперативной подачи воды из других выработок.

**Выводы.** Для локализации пожаров в выработках, не оборудованных противопожарным трубопроводом, или тех, в которых не обеспечивается нормативный расход воды, предложено обустраивать противопожарные разрывы. Разработан метод расчета их длины.

Такой вариант противопожарной защиты может применяться в качестве обоснования отсутствия противопожарного трубопровода при разработке проектов противопожарной защиты угольных шахт.

При этом следует учесть, что данный способ противопожарной защиты неприменим в конвейерных выработках и очистных участках.

#### Список литературы / References

1. Гребёнкин, С.С. Нормативные требования к локализации пожаров в горных выработках угольных шахт / С.С. Гребёнкин, А.А. Диденко // Вестник Института гражданской защиты Донбасса: науч. журн. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып. 4(8). – С. 13 – 18.

Grebyonkin, S.S., Didenko, A.A. *Normativnyye trebovaniya k lokalizatsii pozharov v gornykh vyrabotkakh ugol'nykh shacht* [Normative requirements to localization of fires in mine workings of coal mines]. *Vestnik Instituta grazhdanskoy zashchity Donbassa: nauch. zhurn.* [Donbass International Journal of Emergency and Applied Knowledge Management: scientific journal]. Donetsk, DonNTU, 2016, issue 4(8), pp. 13 – 18.

2. Лапин, К.И. Параметры противопожарных разрывов в горных выработках / К.И. Лапин, А.Ю. Коляда // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 111 – 118.

Lapin, K.I., Kolyada, A.Yu. *Parametry protivopozharnykh razryvov v gornykh vyrabotkakh* [Parameters of fire breaks in mine workings]. *Gornospasatel'noye delo:*

*sb. nauch. tr. / NIIGD “Respirator”* [Proc. of the NIIGD “Respirator” “Mine-rescue work”]. Donetsk, 2012, issue 49, pp. 111 – 118.

3. Лапин, К.И. Противопожарный разрыв в сети горных выработок шахт / К.И. Лапин, Д.С. Буряк // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 122 – 127.

Lapin, K.I., Buryak, D.S. *Protivopozharnyy razryv v seti gornykh vyrabotok shakht* [A fire break in a mine working network of mines]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD “Respirator”* [Proc. of the NIIGD “Respirator” “Mine-rescue work”]. Donetsk, 2013, issue 50, pp. 122 – 127.

4. Гребёнкин, С.С. Расчет параметров противопожарных разрывов в горных выработках. Постановка задачи // С.С. Гребёнкин, И.Ф. Дикенштейн, А.А. Диденко / Вестник Института гражданской защиты Донбасса: науч. журн. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – Вып. 3(3). – С. 36 – 41.

Grebyonkin, S.S., Dikenshteyn, I.F., Didenko, A.A. *Raschet parametrov protivopozharnykh razryvov v gornykh vyrabotkakh. Postanovka zadachi* [Calculation of parameters of fire breaks in mine workings. Problem statement]. *Vestnik Instituta grazhdanskoj zashchity Donbassa: nauch. zhurn.* [Donbass International Journal of Emergency and Applied Knowledge Management: scientific journal]. Donetsk, DonNTU, 2015, issue 3(3), pp. 36 – 41.

5. Коляда, А.Ю. Оптимизация параметров комбинированного противопожарного разрыва в шахтах // А.Ю. Коляда, И.Ф. Дикенштейн, А.А. Диденко / Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 1(53). – С. 31 – 39.

Kolyada A.Yu., Dikenshteyn, I.F., Didenko, A.A. *Optimizatsiya parametrov kombinirovannogo protivopozharnogo razryva v shakhtakh* [Optimization of parameters of a combined fire break in mines]. *Nauchnyy vestnik NIIGD “Respirator”: nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 31 – 39.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 12.11.2018

*Artyom Alekseyevich Didenko*, scientific associate; e-mail: [didenartem89@gmail.com](mailto:didenartem89@gmail.com)

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-40

## **FIRE BREAKS AS MEANS OF LOCALIZATION OF UNDERGROUND FIRES**

**Purpose.** Working-out the method of calculation of the length of fire breaks.

The **methods** are based on the application of analytical dependences for calculation of parameters of underground open fires in the ventilated mine workings.

**Results.** To localize the fires in the mine workings not equipped with the fire pipeline or in those where the normative water consumption is not ensured it is proposed to develop fire breaks, i.e. mine working areas, in which the fire load and ignition sources are not available. In connection with that fact that the fire can origin anywhere in the mine working the fire breaks should be developed along its whole length at stated intervals which length must be less or equal to the distance of fire propagation for the mine working given. Depending on the amount and kind of the fire load placed in the mine working, its cross-section, ventilation stream velocity one must calculate thermal capacity of the fire, length of the combustion and smoldering zones, distance of fire propagation along the mine working, temperature in the combustion zone and at the outlet from the accidental area. On the basis of these data the length of the fire breaks being developed for localization of the underground fire and the space between them are determined. This fire protection method is not applicable in conveyor mine workings and mining districts.

**Scientific novelty.** The method of fire protection of the mine workings not equipped with the fire pipeline has been proposed by means of development of the fire breaks in them for the first time. Such a method can be recommended for fire protection of the coal mines if the fire pipeline is not available.

**Practical value.** The development of the fire breaks in the mine workings not equipped with the fire pipeline will permit to localize the underground fire excluding its propagation along the whole mine working.

**Keywords:** *fire break; underground fire; fire pipeline; project of fire protection of the mine; mine working; localization; fire load; temperature.*

## II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [622.4:622.822]:681.513.2

*Николай Викторович Карнаух, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: [avrstla@mail.ru](mailto:avrstla@mail.ru);*

*Александр Викторович Мавроди, ведущий инж.; e-mail: [mavrodi-av@mail.ru](mailto:mavrodi-av@mail.ru);*

*Владимир Владимирович Захлебин, инж. I кат.; e-mail: [avarvent@mail.ru](mailto:avarvent@mail.ru);*

*Александр Владиславович Агарков, инж. I кат.; e-mail: [aleksander\\_agarkov@mail.ru](mailto:aleksander_agarkov@mail.ru)*

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

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-34*

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ ПРОВЕТРИВАНИЯ ШАХТЫ

**Цель.** Обоснование и выбор параметров аварийных режимов проветривания при выводе горнорабочих из аварийного участка шахты и выполнении горноспасательных работ с использованием программы расчета естественного воздухораспределения и обработки депрессионной съемки РЕВОД.

**Методы.** Комплексное исследование, включающее анализ и прогнозирование распределения воздуха и метана в шахтной вентиляционной сети в нормальном и аварийном режимах проветривания.

**Результаты.** Определен безопасный режим проветривания для выхода горнорабочих на свежую струю при пожаре в горной выработке на примере выемочного участка № 61 пласта  $h_{10}^B$  шахты «Иловайская».

**Научная новизна.** Предложен системный подход и расширена оценка влияния различных факторов при выборе аварийных режимов проветривания путем комплексного моделирования, включающего в себя анализ возможных аварий, а также проведение дополнительных расчетов, которые позволяют улучшить качество прогнозирования аэрогазотермодинамических процессов, протекающих в горных выработках, повысить эффективность ведения горноспасательных работ.

**Практическая значимость.** Изложен комплексный метод анализа аварийных режимов проветривания, предусматриваемых в планах ликвидации аварий и обеспечивающих наиболее безопасный выход горнорабочих на свежую струю. Этот метод рекомендован для использования угольными шахтами и подразделениями Государственной военизированной горноспасательной службы Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики при составлении планов ликвидации аварий.

**Ключевые слова:** угольная шахта; пожар; план ликвидации аварий; аварийный вентиляционный режим; тепловая депрессия; распределение воздуха и метана.

**Постановка проблемы.** Анализ аварийности на горных предприятиях [1] показывает, что с ростом глубины разработки, мощности и энерговооруженности шахт опасность возникновения пожаров остается высокой. Практикой ведения горноспасательных работ установлено [2], что успех спасения горнорабочих, застигнутых в шахте аварией, и эффективность действия горноспасателей по ее ликвидации во многом зависят от выбора аварийного режима проветривания [3, 4], который должен быть устойчивым

и управляемым, а депрессия, создаваемая вентилятором главного проветривания в рассматриваемой выработке, должна превышать тепловую депрессию ( $h_T < h_{кр}$ ).

**Состояние вопроса.** Высокая температура пожара, сильная задымленность, превышение предельно допустимых концентраций горючих газов в выработках аварийного участка требуют применения комплексного метода предварительного моделирования воздухораспределения и оценки газовой обстановки с учетом тепловой депрессии пожара. Кроме того, необходимы дополнительные мероприятия по обеспечению выхода горнорабочих на свежую струю, проведению разведки и ликвидации последствий аварии.

**Результаты исследований.** С целью выбора аварийного режима проветривания при возникновении аварийной ситуации «пожар» на примере выемочного участка № 61 пласта  $h_{10}^B$  шахты «Иловайская» были проведены теоретические исследования и расчет газо- и воздухораспределения в программной системе РЕВОД, которая обеспечивает оперативное решение комплекса задач воздухо- и газораспределения в шахтной вентиляционной сети.

Лаву № 61 отработывают по сплошной системе разработки с двумя тупиковыми забоями, проветриваемыми вентиляторами местного проветривания. Свежий воздух к участку подают по конвейерному ходку № 33 с расходом  $1617,8 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Исходящую струю отводят по вентиляционному штреку № 33, вентиляционному ходку № 35, полевому магистральному штреку на фланговый наклонный ствол, оборудованный вентиляторами ВЦД-31,5М2. Газообильность участка  $8,07 \text{ м}^3/\text{мин}$ , шахты  $14,9 \text{ м}^3/\text{мин}$ , расчетный расход воздуха  $1080 \text{ м}^3/\text{мин}$ , с учетом вентилятора местного проветривания на вентиляционном штреке  $1302,6 \text{ м}^3/\text{мин}$ . Средняя объемная доля метана в исходящей из участка струе составляет 0,62 % (рис. 1).

Система вентиляции выемочного участка № 61 характеризуется его удаленностью от основных путей движения свежего воздуха (28-й западный откаточный штрек), схемой проветривания лавы с последовательным разбавлением вредностей и ее практической однолинейностью, наличием нестандартного тупика вентиляционной выработки, проветриваемого вентилятором местного проветривания, подачей свежего воздуха по конвейерной выработке значительной длины, что не позволяет горнорабочим выйти на свежую струю за время действия самоспасателя.

В условиях шахты в зависимости от вида и места возникновения аварии может быть предусмотрен нормальный режим проветривания или общешахтное реверсирование, а также реверсирование вентиляционной струи основного вентилятора с дополнительным включением в работу на всасывание остановленного вентилятора на скважине № 1. При этом главное условие – обеспечение выхода горнорабочих на свежую струю, предупреждение поступления к очагу пожара взрывоопасной метановоздушной смеси и обеспечение устойчивости выбранного режима проветривания.

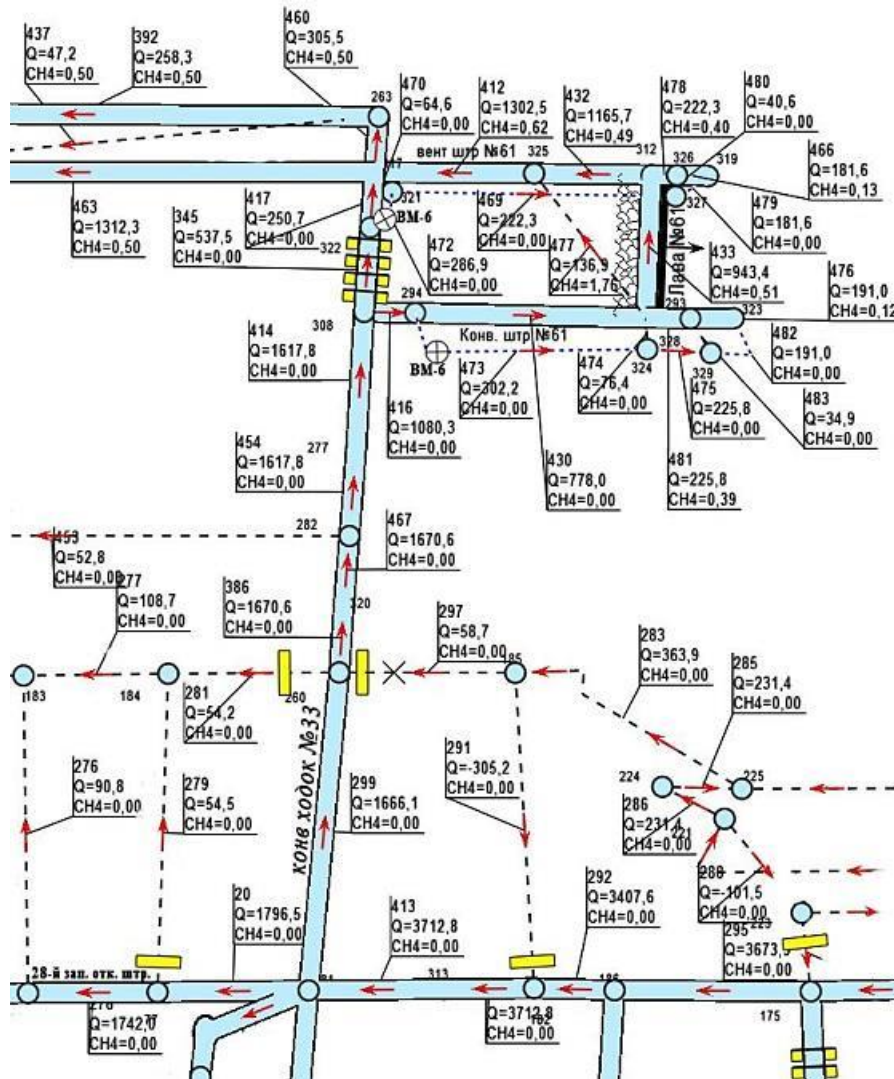


Рис. 1. Распределение воздуха и метана на участке лавы № 61 при нормальном режиме проветривания

Результаты расчета газо- и воздухораспределения предлагаемого общешахтного реверсивного вентиляционного режима (рис. 2) при ликвидации пожара в конвейерном ходке № 33 указывают на возможность опрокидывания вентиляционной струи аварийной выработки № 33 и на всем участке лавы № 61. Наряду с этим, в лаве № 61 расход воздуха составит всего 13,8 % при норме 60 %, а объемная доля метана возрастет в шесть раз, составит 3,08 % и будет выше предельно допустимых значений. В утечках воздуха через выработанное пространство она составит 11,7 %. В трубопроводах и тупиках выработок при остановленных вентиляторах местного проветривания и в других местах без активного проветривания объемная доля метана может достигать 50 и даже 100 % (табл. 1). Струя с высокой концентрацией метана поступает к очагу пожара.

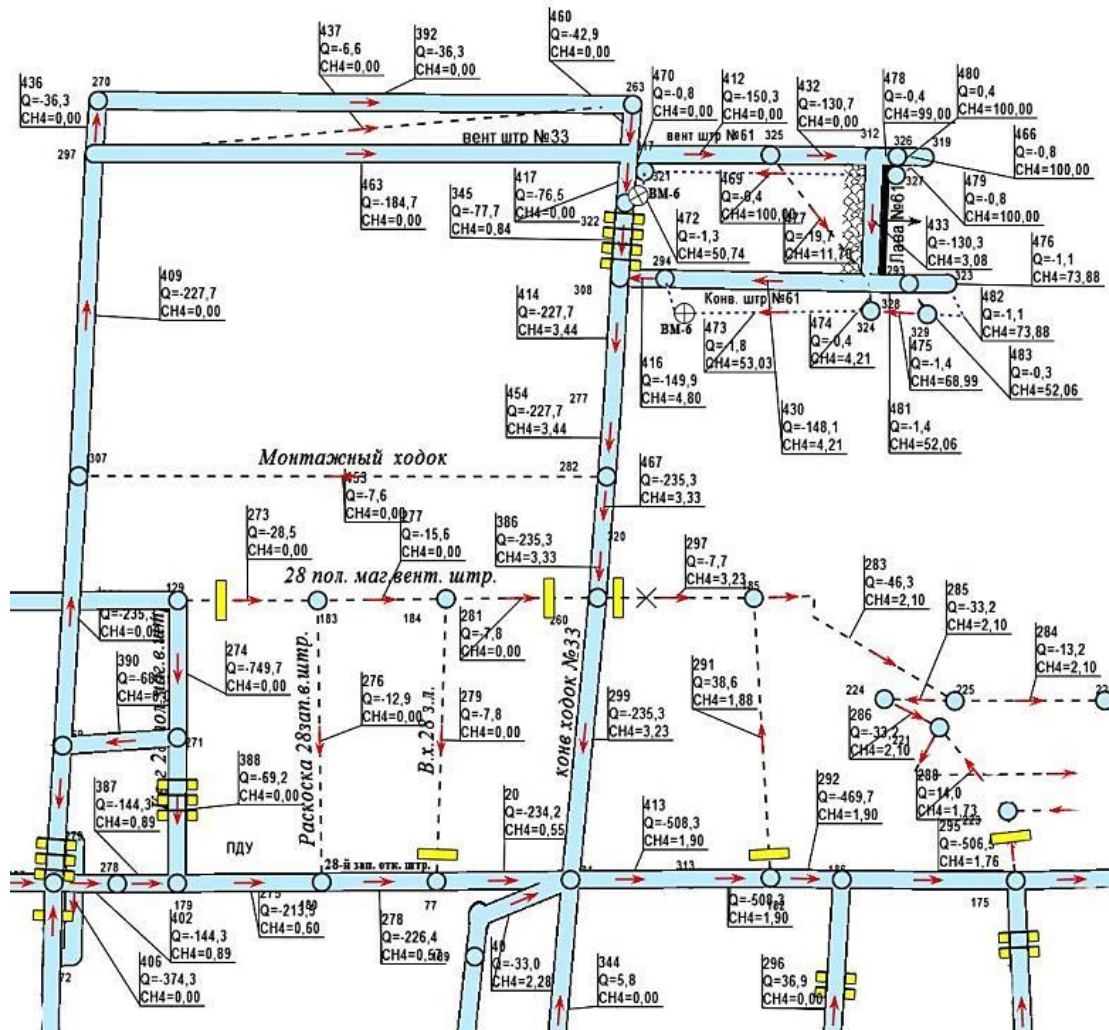


Рис. 2. Распределение воздуха на участке лавы № 61 при общешахтном реверсировании вентиляционной струи без учета влияния тепловой депрессии пожара

Таблица 1

Ожидаемая объемная доля метана в ветвях вентиляционной сети при реверсировании вентиляционной струи без учета влияния тепловой депрессии пожара

Параметр	Значение параметров для ветвей на схеме					
	433	473	482	477	478	472
Расход воздуха, м <sup>3</sup> /мин	130,3	1,8	1,1	19,7	0,4	1,3
Объемная доля метана, %	3,08	53,03	73,88	11,70	99,00	50,74

Таким образом, общешахтное реверсирование без учета депрессии пожара (начальная стадия развития пожара) не обеспечивает безопасности выхода горнорабочих, создает весьма опасные концентрации метана в отдельных выработках выемочного участка.

Применение реверсивного вентиляционного режима с учетом тепловой депрессии пожара в конвейерном ходке № 33 приводит к опрокидыванию вентиляционной струи аварийной выработки и на участке лавы № 61, что влечет за собой поступление воздушной струи воздуха с предельно допустимыми значениями концентрации метана (рис. 3, табл. 2).

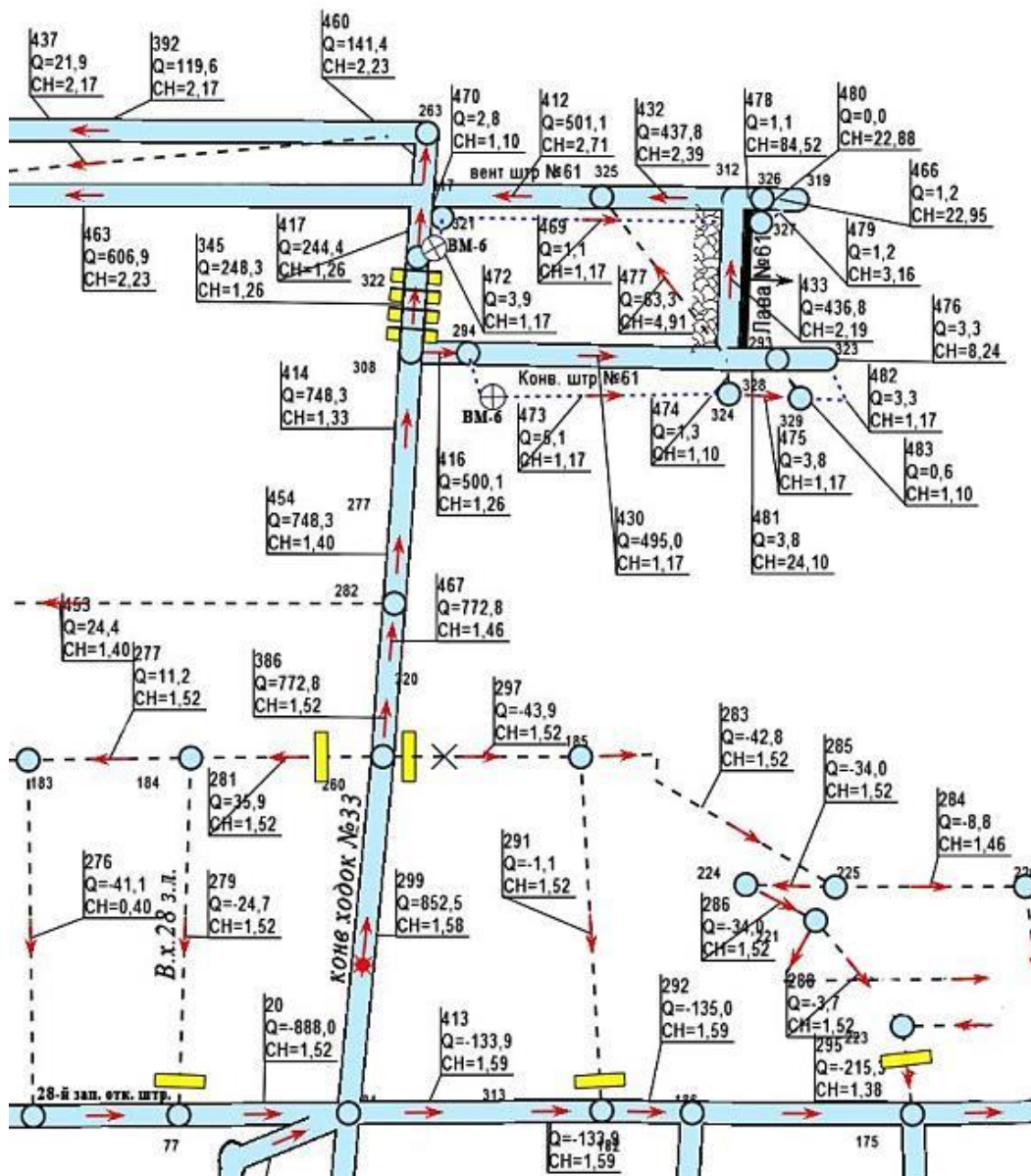


Рис. 3. Распределение воздуха на участке лавы № 61 при общешахтном реверсировании вентиляционной струи в случае возникновения аварии «пожар» в конвейерном ходке № 33 с учетом тепловой депрессии пожара

Таблица 2

Результаты расчета распределения воздуха на участке лавы № 61 при общешахтном реверсировании вентиляционной струи с учетом влияния тепловой депрессии пожара

Номер ветви	Номер узла		Расход газовой смеси, м <sup>3</sup> /мин			Объемная доля метана, %
	начальный	конечный	всего	в том числе		
				воздуха	метана	
392	263	270	119,6	117,0	2,5901	2,16
412	325	317	501,1	487,6	13,5697	2,71
432	312	325	437,8	427,4	10,4634	2,39
433	293	312	436,8	427,2	9,5711	2,19
460	317	263	141,4	138,3	3,1506	2,23
463	317	297	606,9	593,4	13,5218	2,23

График изменения воздухораспределения после возникновения и распространения пожара в наклонной выработке (100 МВт на 10 м) демонстрирует влияние инерционности воздуха на его движение (рис. 4). Опрокидывание воздушной струи и дальнейшее изменение расхода воздуха происходит в течение нескольких секунд, что является причиной проявления воздушной инерции.

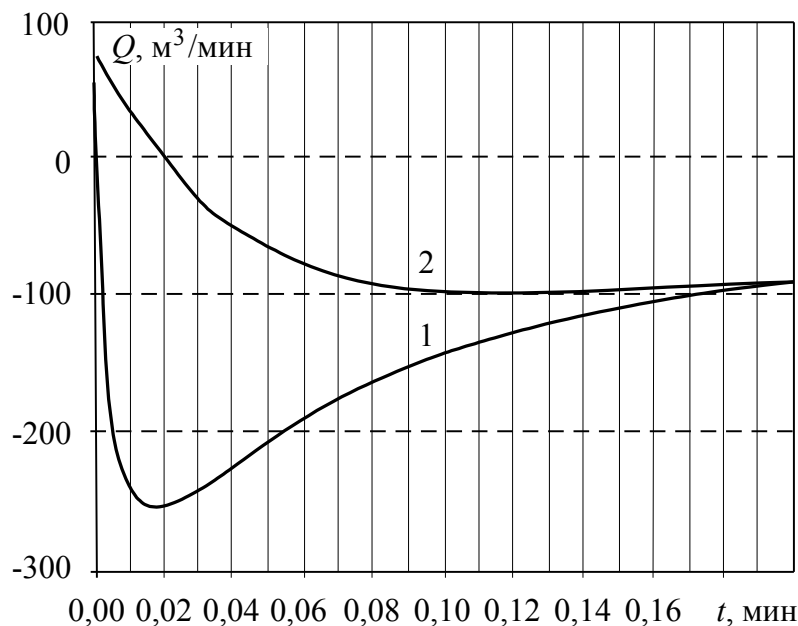


Рис. 4. Расчетные изменения расхода воздуха в наклонной выработке после возникновения пожара:

1 — без учета инерции воздуха; 2 — с учетом инерции воздуха

Расчеты показывают, что к медленным процессам следует отнести изменения расхода воздуха, происходящие в течение нескольких минут. Если же эти изменения наблюдаются в течение нескольких секунд, то квазистационарное моделирование приводит к большим погрешностям и возникает необходимость учитывать инерционность воздуха. Подобная ситуация возникает при моделировании пожаров в горных выработках, когда нарастающие тепловые депрессии в считанные секунды изменяют движение воздуха вплоть до опрокидывания потоков.

Тепловую депрессию  $h_T$  следует находить по номограмме (рис. 5 [2]) согласно значениям  $Q$ ,  $S$ ,  $a$ ,  $\bar{x}$ ,  $z$  в направлении ABCDEF.

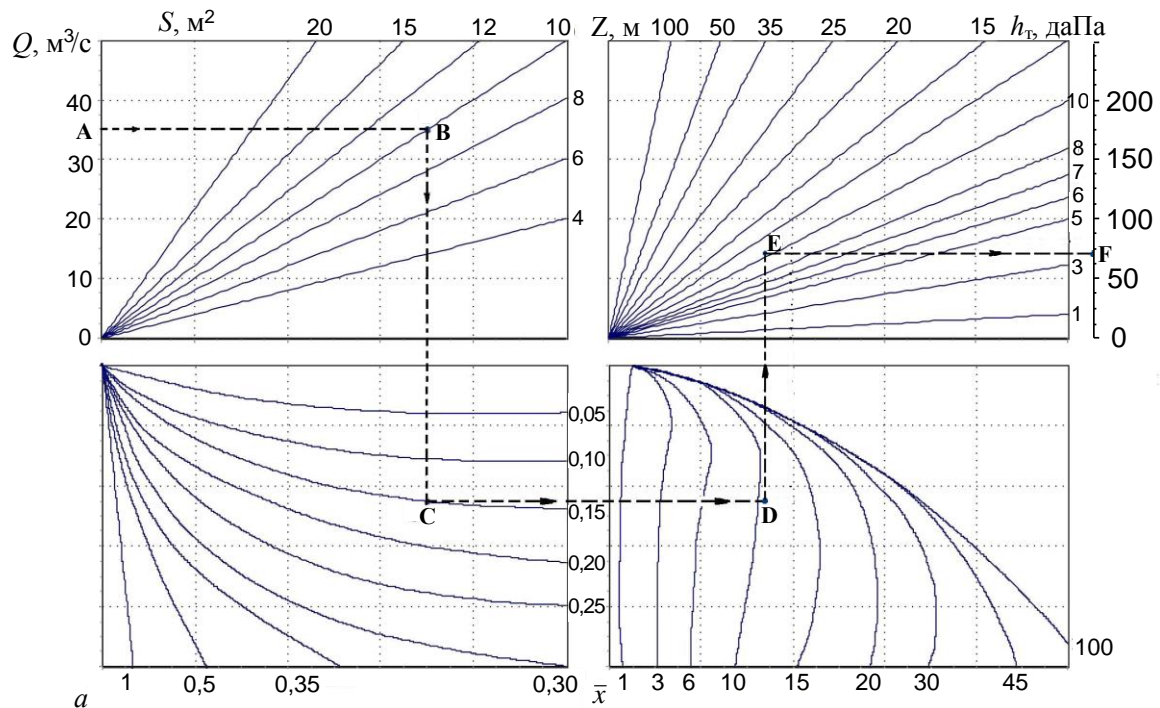


Рис. 5. Номограмма для определения тепловой депрессии при пожаре в горной выработке

Тепловую депрессию  $h_T$  рассчитывают следующим образом. Определяют длину зоны горения  $l$ , м:

$$l = t (0,28 + 0,07 Q/S), \quad (1)$$

где  $t$  – время, прошедшее с момента возникновения пожара, мин. В случаях, когда с момента возникновения пожара прошло более 2,5 ч, значение  $t$  принимают равным 150 мин;

$Q$  – расход воздуха в выработке до возникновения пожара,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$S$  – средняя площадь поперечного сечения выработки,  $\text{м}^2$ .

Параметр  $a$  равен

$$a = \sqrt{S} / l. \quad (2)$$

Относительное расстояние вычисляют следующим образом:

$$\bar{x} = x / \ell, \quad (3)$$

где  $x$  – расстояние от места возникновения пожара до конца наклонной выработки по ходу движения струи воздуха, м.

Длина зоны горения по вертикали, м, равна

$$z = \ell \sin \beta, \quad (4)$$

где  $\beta$  – угол наклона выработки, ...°.

При углах наклона выработки  $\beta \leq 30^\circ$  следует вместо формулы (4) использовать формулу

$$z = 0,017\beta\ell. \quad (5)$$

Представленные расчетные формулы базируются на общеизвестных параметрах, что определяет простоту расчетов.

**Выводы.** При ликвидации аварии «пожар» на шахтах применяемые вентиляционные режимы требуют расширенной оценки влияния различных факторов путем комплексного компьютерного моделирования, который включает в себя проведение дополнительных расчетов, в том числе с учетом тепловой депрессии пожара, что позволит существенно повысить качество прогнозирования аэрогазотермодинамических процессов, протекающих в горных выработках.

Системное проектирование вентиляции угольных шахт на всех стадиях развития горного объекта должно базироваться на использовании единой динамической (трансформируемой по мере развития объекта) трехмерной модели аэрогазотермодинамических процессов для обоснования и оптимизации технических и технологических решений по обеспечению аэрологической безопасности подземных горных работ.

Из рассмотренных аварийных режимов проветривания при пожаре на конвейерном ходке № 33 шахты «Иловайская» предпочтение следует отдать нормальному режиму как более надежному и устойчивому, не требующему изменения схемы проветривания, ее параметров и режимов работы вентиляторов главного проветривания, реверсивных, переключающих и герметизирующих устройств и дверей. Для обеспечения безопасного выхода горнорабочих на свежую струю необходим пункт переключения в резервные самоспасатели.

## Список литературы / References

1. Стась, Г.В. Аварийность и травматизм на горно-металлургических предприятиях / Г.В. Стась, Е.В. Смирнова // Известия ТулГУ. – Тула, 2015. – Вып. 1. – С. 31 – 37.

Stas' G.V., Smirnova, Ye.V. *Avariynost' i travmatizm na gorno-metallurgicheskikh predpriyatiyakh* [Accident rate and traumatism at mining and smelting enterprises]. *Izvestiya TulGU* [Proceedings of the TulGU]. Tula, 2015, issue 1, pp. 31 – 37.

2. Пашковский, П.С. Проветривание шахт при подземных пожарах / П.С. Пашковский, В.И. Лебедев. – Донецк: Арпи, 2012. – 448 с.

Pashkovskiy, P.S., Lebedev, V.I. *Provetrivaniye shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation of mines by underground fires]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 448 p.

3. Попов, В.Б. Организация проветривания угольных шахт в аварийных ситуациях / В.Б. Попов, Ли Хи Ун, В. Г. Игишев // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной пром-сти. – Кемерово, 2016. – С. 62 – 65.

Popov, V.B., Li Khi Un, Igishev, V.G. *Organizatsiya provetrivaniya ugol'nykh shacht v avariynykh situatsiyakh* [Organization of ventilation of coal mines in emergencies]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti* [Bulletin of the Scientific centre on safety of operations in coal industry]. Kemerovo, 2016, pp. 62 – 65.

4. Лискова, М.Ю. Управление режимами вентиляции в аварийных ситуациях / М.Ю. Лискова, И.С. Наумов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – Москва, 2015. – Вып. 2. – С. 109 – 111.

Liskova, M.Yu., Naumov, I.S. *Upravleniye rezhimami ventilyatsii v avariynykh situatsiyakh* [Ventilation conditions management in emergencies]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* – *Mining information-analytical newsletter*, Moscow, 2015, issue 2, pp. 109 – 111.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.  
Дата поступления рукописи 13.07.2018

*Nikolay Viktorovich Karnaukh, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: [avrstla@mail.ru](mailto:avrstla@mail.ru);*

*Aleksandr Viktorovich Mavrodi, advanced engineer; e-mail: [mavrodi-av@mail.ru](mailto:mavrodi-av@mail.ru);*

*Vladimir Vladimirovich Zakhlebin, engineer of the 1<sup>st</sup> category; e-mail: [avarvent@mail.ru](mailto:avarvent@mail.ru);*

*Aleksandr Vladislavovich Agarkov, engineer of the 1<sup>st</sup> category; e-mail: [aleksander\\_agarkov@mail.ru](mailto:aleksander_agarkov@mail.ru)*

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

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

## COMPUTER MODELING THE EMERGENCY CONDITIONS OF MINE VENTILATION

**Purpose.** Substantiation and choice of parameters of the emergency ventilation conditions by withdrawal of mine workers from an emergency zone of a mine and carrying-out the mine-rescue operations with the use of the ПЕБОД program of calculation of the natural air distribution and depression survey processing.

**Methods.** Comprehensive investigation including analysis and prognostication of the air and methane distribution in the mine ventilation network under normal and emergency ventilation conditions.

**Results.** The safe ventilation conditions for withdrawal of the mine workers to fresh air by a fire in a mine working have been determined in terms of the working area no. 61 of the  $h_{10}^B$  seam in the “Ilovayskaya” mine.

**Scientific novelty.** The system approach has been proposed, and the estimate of the influence of various factors has been expanded by choice of emergency ventilation states by means of the comprehensive modeling enclosing the analysis of possible emergencies and execution of additional calculations that permit to make better the quality of prognostication of aerogasthermodynamic processes progressing in the mine workings as well as to increase efficiency of carrying-out the mine-rescue operations.

**Practical value.** The comprehensive method of analysis of the emergency ventilation states being specified in emergency control plans and ensuring the safest withdrawal of the mine workers to fresh air has been explained. This method is recommended for application by coal mines and subdivisions of the State Para-military Mine-rescue Service of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters during composition of the emergency control plans.

**Keywords:** *coal mine; fire; emergency control plan; emergency ventilation conditions; thermal drop of ventilation pressure; air and methane distribution.*

**УДК 614.844.2:631.243.2**

**Андрей Юрьевич Коляда**, нач. отд.; e-mail: [kolyada1980@mail.ru](mailto:kolyada1980@mail.ru)

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-39;

**Дмитрий Валерьевич Реутов**, ст. помощник начальника дежурной смены; e-mail: [reutoff74@yandex.ua](mailto:reutoff74@yandex.ua)

Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР

283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел. (+38 062) 340-62-28;

**Игорь Феликсович Дикенштейн**, науч. сотр.; e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@mail.ru);

**Дарья Федоровна Балта**, науч. сотр.; e-mail: [balta\\_daria@mail.ru](mailto:balta_daria@mail.ru)

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-41

## **ЛОКАЛИЗАЦИЯ ПОЖАРОВ НА ОТКРЫТЫХ СКЛАДАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КОРМОВ**

**Цель.** Создание методики расчета параметров водяных завес, используемых для повышения эффективности локализации и тушения пожаров на открытых складах сельскохозяйственных кормов.

**Методика.** Аналитические исследования и математические расчеты параметров пожара и водяных завес, применяемых для экранирования и ликвидации пожаров.

**Результаты.** Изучены пожары на открытых объектах хранения сена, соломы и кормов. Выполнен расчёт основных параметров развития и распространения пожаров, учитывающий геометрические размеры скирд сена (соломы), противопожарные разрывы между стогами, влияние скорости ветра и его направления на положение пламени в пространстве. Разработана методика расчета параметров водяных завес, позволяющая в зависимости от условий пожара принять оптимальный тактический план размещения противопожарных сил и средств. Дана оценка эффективности применения методики на примере установки водяного пожаротушения «Бус-1», разработанной НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР.

**Научная новизна.** Использование адаптированной методики расчета плотности тепловых потоков для лесоматериалов к складам сельскохозяйственных кормов.

**Практическая значимость.** Применение устройств для создания водяных завес существенно сокращает расход воды на тушение, снижает физические нагрузки на участников тушения и сокращает материальный ущерб от пожара, что способствует укреплению кормовой базы животноводства Республики.

**Ключевые слова:** пожар; скирда; солома; сено; тепловой поток; локализация; экранирование; водяная завеса; коэффициент ослабления; эффективность.

**Постановка проблемы.** Один из наиболее опасных пожаров – горение объектов, где хранят сено, солому и корма.

Опасность этих пожаров состоит в том, что они при неконтролируемом развитии могут распространиться на близлежащие сельскохозяйственные объекты, лесные массивы, населенные пункты. При этом возможно распространение пожаров из-за тепловой радиации, конвекции, переноса ветром искр.

На открытых площадках хранят сено и солому (табл. 1).

Таблица 1

## Теплофизические параметры сена и соломы

Материал	Параметры					
	Плотность $\rho_{г.м},$ кг/м <sup>3</sup>	Температура воспламе- нения $T_c,$ °С	Низшая теплота сгорания $Q_{Н}^p,$ кДж/кг	Массовая скорость выгорания $\Psi_{п},$ кг/(м <sup>2</sup> ·с)	Линейная скорость рас- пространения пламени $V_{п},$ м/с	Удельная тепло- емкость $C_p,$ кДж/(кг·К)
Сено	70	205	16652	0,035	0,058	1,3
Солома	120	200	17084	0,027	0,067	1,8

Развитию пожаров в местах хранения сельскохозяйственных кормов способствуют:

- концентрация пожарной нагрузки в сотни тонн на ограниченной площади;
- высокая скорость распространения горения;
- удаленность большинства площадок для хранения сена и соломы от пожарных аварийно-спасательных подразделений, их недостаточная оснащенность средствами обнаружения загорания и первичного пожаротушения;
- удаленность от источников противопожарного водоснабжения.

Примером может служить пожар, возникший на открытой площадке для хранения тюкованного сена и соломы в с. Песчаное Старобешевского района ДНР 07.12.2015.

На площадке было размещено девять скирд тюкованной соломы и сена по 100 т, размерами 14×30 м каждая.

В 19:33 поступило сообщение о пожаре. По прибытии на место вызова было установлено, что горит скирда тюкованной соломы на площади около 150 м<sup>2</sup> и центральная часть стоящей рядом скирды тюкованного сена на площади 15 м<sup>2</sup>. Существовала угроза распространения огня на соседние скирды. На тушение пожара было подано два ручных пожарных ствола Б (DN 50), а на защиту соседних скирд с подветренной стороны – один маневрирующий ручной ствол Б (DN 50). Ситуация осложнялась сильным ветром и большим расстоянием до источников противопожарного водоснабжения. Поэтому сделан вызов «Пожар № 2». Прибыли подразделения четырех ПСЧ. Всего на тушение пожара подано семь ручных пожарных стволов: три ствола Б (DN 50) и четыре ствола А (DN 70), а на защиту соседних скирд – шесть ручных пожарных стволов Б (DN 50).

Через 5 ч пожар локализовали, а еще через 17 ч ликвидировали. В целом на тушение пожара привлекали семь единиц основной пожарно-спасательной техники и три единицы сельскохозяйственной специальной техники (рис. 1).

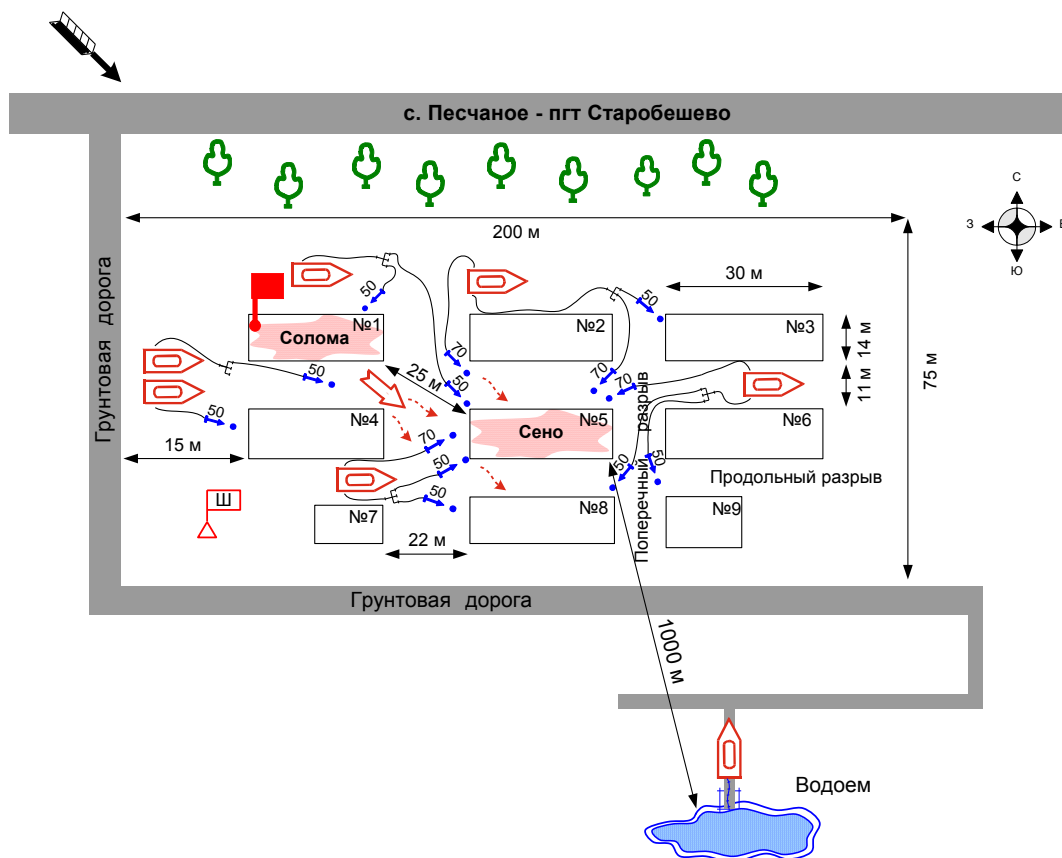


Рис. 1. Схема ликвидации пожара на складе кормов в с. Песчаное

Первоочередная задача в процессе тушения пожара – его локализация, от успешного выполнения которой зависит время ликвидации пожара.

Целесообразно не менее одного ствола подать для орошения поверхности соседней скирды для предотвращения распространения пожара.

При тушении пожара и ведении аварийно-спасательных работ пожарные могут подвергаться воздействию опасных тепловых потоков интенсивностью от 20 до 80 кВт/м<sup>2</sup> и более (при этом безопасным считается порог 4,2 кВт/м<sup>2</sup>). Следует отметить, что при крупных пожарах в зонах, близких к очагу горения, температура среды может достигать 100...150 °С, и даже теплозащитный костюм не спасает ствольщика от опасной тепловой радиации. Возникает ситуация, когда самого ствольщика, локализирующего пожар на определенном направлении, необходимо защищать. Это приводит к дополнительному отвлечению личного состава боевых расчетов и техники от выполнения основной задачи – ликвидации горения, снижает маневренность и оперативность пожарно-спасательного подразделения.

Выходом из ситуации может быть использование для локализации вышеописанных пожаров устройств для создания водяных завес, с помощью которых и локализируют очаг горения без отвлечения личного состава, пожарных стволов и при существенно меньшем расходе воды.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Специальных исследований, посвященных тактике локализации и тушения пожаров на открытых складах сельскохозяйственных кормов, не обнаружено. Имеющиеся публикации касаются в основном пожарной безопасности закрытых складов и площадок [1].

Имеется ряд работ по развитию и тушению пожаров на складах лесоматериалов, результаты которых можно использовать для проведения расчетов по определению параметров водяных завес [2-6].

**Цель работы** – создание методики расчета параметров водяных завес, используемых для повышения эффективности локализации и тушения пожаров на открытых складах сельскохозяйственных кормов.

**Постановка задачи и ее решение.** Для расчета параметров локализации пожара водяными завесами необходимо определить плотность теплового потока от горящей скирды к соседним на площадке для хранения. Воспользуемся для этого методикой, предложенной А.М. Ковалем для открытых складов лесоматериалов, адаптируя ее для условий рассматриваемых пожаров [2 – 4].

Для расчета параметров водяной завесы, устанавливаемой между горящей скирдой и соседними, определим плотность теплового потока  $q_p$ , Вт/м<sup>2</sup>, результирующего излучения от горящей скирды:

$$q_p = \frac{\sigma(T_\phi^4 - T_c^4)}{1/A_\phi + 1/A_c - 1 + 3/4\bar{\alpha}x}, \quad (1)$$

где  $\sigma = 5,7 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – постоянная Стефана-Больцмана;

$T_\phi$  – температура пламени, К;

$T_c$  – температура воспламенения сена (соломы), К;

$A_\phi = 0,9$  – поглощающая способность пламени горящей скирды (стога) сена (соломы);

$A_c = 0,6$  – поглощающая способность материала скирды, который воспринимает излучение от горящей скирды;

$\bar{\alpha}$  – осредненный по спектру коэффициент поглощения среды (по данным работы [2]), м<sup>-1</sup>;

$$\bar{\alpha} = 0,45/l_c,$$

$l_c$  – наибольшее расстояние между скирдами, м;

$x$  – действительное расстояние между скирдами, м.

Температуру пламени  $T_\phi$ , К, горящей скирды по аналогии с [3] определяем по формуле

$$T_\phi = \frac{Q_H^p \Psi_n \tau_{ск}}{c_p G}, \quad (2)$$

где  $Q_H^p$  – низшая теплота сгорания материала скирды – сена, соломы, кДж/кг;  
 $\Psi_{\Pi}$  – удельная скорость выгорания материала скирды (стога), кг/(м<sup>2</sup>·с);  
 $\tau_{ск}$  – время охвата пламенем одной скирды, с;  
 $C_p$  – удельная теплоемкость материала скирды, кДж/(кг·К);  
 $G$  – пожарная нагрузка, кг/м<sup>2</sup>.

В работе [7] на основании проведенных экспериментальных исследований предложена эмпирическая зависимость для определения линейной скорости распространения пламени  $V_{пв}$ , м/с, по штабелю лесоматериалов с учетом скорости ветра и направления его действия на штабеля

$$V_{пв} = V_{\Pi} K_B K_{\alpha}, \quad (3)$$

где  $V_{\Pi}$  – скорость распространения пламени по штабелю при отсутствии ветра, м/с;  
 $K_B = 0,9912e^{0,0388V_B}$  – коэффициент, учитывающий влияние скорости ветра на скорость распространения пламени по штабелю;  
 $V_B$  – скорость ветра, м/с;  
 $K_{\alpha}$  – коэффициент, учитывающий влияние направления ветра на скорость распространения пламени по штабелю лесоматериалов.

$$K_{\alpha} = 0,374 + 0,0123\alpha - 5 \cdot 10^{-5}\alpha^2, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол направления ветра, ...°.

Применим зависимости (3), (4) для скирд сена (соломы), учитывая, что по результатам экспериментальных исследований, проведенных в работе [1], скорость распространения пламени по прямоугольной скирде соломы равна

$$V_{\Pi} = 4 \text{ м/мин} = 0,067 \text{ м/с.}$$

Тогда время охвата пламенем одной скирды  $\tau_{ск}$ , с, по аналогии с [2]

$$\tau_{ск} = 2 \sqrt{\frac{S_{ск}}{\beta V_{пв}^2}}, \quad (5)$$

где  $S_{ск}$  – площадь поверхности скирды, которая подвергается охвату пламенем пожара, м<sup>2</sup>;

$$S_{ск} = b l + 2h(b + l), \quad (6)$$

$h, b, l$  – геометрические размеры прямоугольной скирды, м;

$\beta$  – коэффициент, учитывающий форму пожара:

$\beta = \pi$  – при круговой форме;

$\beta = \pi/2$  – при угловой ( $180^\circ$ ) форме;  
 $\beta = \pi/4$  – при угловой ( $90^\circ$ ) форме пожара.  
 Тепловой поток излучения  $Q$ , Вт:

$$Q = q_p S_{\text{изл}}, \quad (7)$$

где  $S_{\text{изл}}$  – площадь излучающей поверхности горячей скирды с учетом высоты  $H$ , м, конвективной колонки над скирдой,  $\text{м}^2$ .

Согласно [2]  $H \approx 1 \dots 2$  м.

Тогда температура на боковой поверхности соседней с горячей скирдой  $T_{\text{ск}}$ , К, определяется по формуле

$$T_{\text{ск}} = \frac{Q}{\alpha_{\text{ск}} S_{\text{ск}}}, \quad (8)$$

где  $\alpha_{\text{ск}}$  – коэффициент теплоотдачи боковой поверхности скирды,  $\text{кВт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Усредненное значение коэффициента теплопередачи согласно [8]

$$\alpha_{\text{ск}} = 0,015 \left( \frac{b l h \rho_{\text{г.м}}}{S_{\text{изл}}} \right)^{0,222}, \quad (9)$$

где  $\rho_{\text{г.м}}$  – плотность горючего материала,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Если  $T_{\text{ск}} > T_{\text{заг}}$ , где  $T_{\text{заг}}$  – температура возгорания горючего материала в скирде, то происходит возгорание соседней скирды.

Для выполнения условия  $T_{\text{ск}} < T_{\text{заг}}$  максимально допустимый тепловой поток на соседнюю скирду равен

$$Q' = \alpha_{\text{ск}} S_{\text{ск}} (T_{\text{заг}} - T_0), \quad (10)$$

где  $T_0$  – температура окружающей среды, К,

а требуемое значение коэффициента пропускания теплоты завесой  $H_{\text{зав}}$ :

$$H_{\text{зав}} = Q'/Q. \quad (11)$$

Для расчета этой величины в научно-технической литературе используют зависимость [9]

$$H_{\text{зав}} = \exp \left[ -1,4(1 - \eta) \frac{l_s}{D_{\text{eq}}} \right], \quad (12)$$

где  $\eta$  – коэффициент пропускания теплоты каплей диаметром  $D_{\text{eq}}$ ;

$l_s$  – толщина эквивалентного слоя воды в завесе, м;

$D_{\text{eq}}$  – эквивалентный диаметр капель воды в завесе, м.

Для определения этих величин использованы следующие соотношения [10 – 14]:

$$D_{eq} = 0,02108(U_0)^{-\frac{4}{3}}(d_0)^{\frac{1}{12}}; \quad (13)$$

$$U_0 = \frac{4q_B}{\pi d_0^2}; \quad (14)$$

$$\eta = AD_{eq}^B + C; \quad (15)$$

$$A = 1,25 \cdot 10^{-35}(T_\phi - 207,6)^{11,02}; \quad (16)$$

$$B = -2,329 + 1,6362 \cdot 10^{-3}T_\phi + 1,0519 \cdot 10^{-6}T_\phi^2 - \\ -1,386 \cdot 10^{-9}T_\phi^3 + 5 \cdot 10^{-13}T_\phi^4 - 0,651 \cdot 10^{-16}T_\phi^5; \quad (17)$$

$$C = -9,59 \cdot 10^{-5} \cdot 10^{0,002495T_\phi}; \quad (18)$$

где  $U_0$  – скорость капель воды на выходе из распылителя, м/с;

$d_0$  – диаметр выходного отверстия распылителя, м;

$q_B$  – расход воды через один распылитель, м<sup>3</sup>/с.

НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР разработана установка для оперативной локализации пожаров «Бус-1».

Установка «Бус-1» (рис. 2) состоит из следующих составных частей:

- распределительного трубопровода со стойкой, вводом и тремя центробежно-струйными распылителями;
- трех шлангов, предназначенных для подачи воды к распылителям;
- основания с четырьмя складными ножками для крепления установки на почве;
- двух крепежных тросов с крюками для фиксации установки.

Собранная конструкция размещается на почве, навстречу пожару.

Используемые в установке центробежные распылители создают полнозаполненные факелы мелкораспыленной воды.

#### Параметры установки «Бус-1»

Давление воды, МПа, не менее .....	0,4
Расход воды, м <sup>3</sup> /ч, не менее .....	12,0
Глубина завесы, м, не менее .....	5,0
Диаметр факела распыленной воды из одного распылителя, м, не менее .....	3,0
Габариты, мм, не более .....	2000×1200×1200
Масса, кг, не более .....	50,0

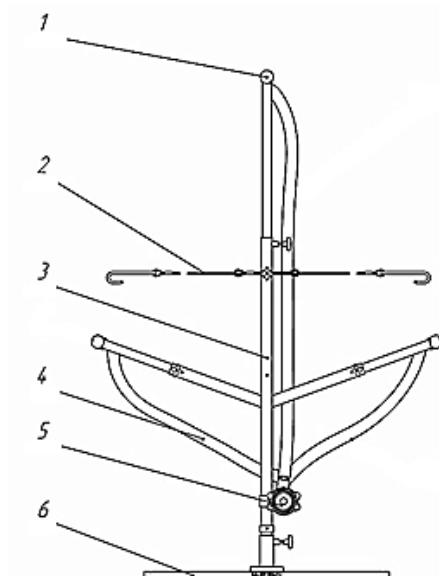


Рис. 2. Установка водяного пожаротушения для оперативной локализации пожаров «Бус-1»:

1 – центробежно-струйный распылитель; 2 – крепежный трос; 3 – стойка; 4 – шланг; 5 – ввод; 6 – основание

Оценим возможность применения установок «Бус-1» для локализации пожаров на примере вышеописанного пожара в с. Песчаное (табл. 2).

Таблица 2

### Расчетные параметры пожара в с. Песчаное

Параметр	Горящие скирды	
	№ 1	№ 2
Размеры, м:		
длина	30	30
ширина	14	14
высота	2,5	3,5
Скорость распространения пламени с учетом ветра $V_{пв}$ , м/с	0,073	0,064
Время охвата пламенем скирды $\tau_{ск}$ , с	782	473
Температура факела горячей скирды $T_{ф}$ , К	1285	1093
Температура боковой поверхности соседней скирды $T_{ск}$ , К	Скирды № 2 1197 Скирды № 4 1226	Скирды № 6 461 Скирды № 8 590
Возможное воспламенение соседних скирд	Возможно	Возможно воспламенение скирды № 8

Применим для локализации установку «Бус-1» и рассчитаем эффективность создаваемой ею водяной завесы.

По формулам (13) - (18) рассчитываем эффективность завесы, создаваемой установкой «Бус-1», для рассматриваемого пожара в с. Песчаное.

Для значений  $q_b = 0,0011 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $d_0 = 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $l_s = 15 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ ;  $T_\phi = 1281 \text{ К}$  получаем:  $U_0 = 14,2 \text{ м/с}$ ;  $D_{eq} = 4,2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ ;  $A = 0,0313$ ;  $B = -0,297$ ;  $C = 0,151$ ;  $\eta = 0,467$ ;  $H_{зав} = 0,766$ .

Таким образом, завеса, созданная установкой «Бус-1», снижает интенсивность теплового потока в среднем на 77,0 %. Тогда температура боковых стенок соседних с горящими скирд будет ниже температуры возгорания материала в них, т.е. локализация обеспечена.

Исходя из размера образуемой завесы  $D_{зав} = 6,2 \text{ м}$  общую площадь экранирования одной установкой «Бус-1» примем:  $S_{зав} = \pi D_{зав}^2 / 4 = 30 \text{ м}^2$ .

Отсюда необходимое количество установок, размещаемых в поперечном и продольном разрывах:  $n_{поп} \approx 2$ ;  $n_{пр} \approx 3$ .

План-схема расстановки сил и средств при локализации пожара водяными завесами примет вид, приведенный на рис. 3.

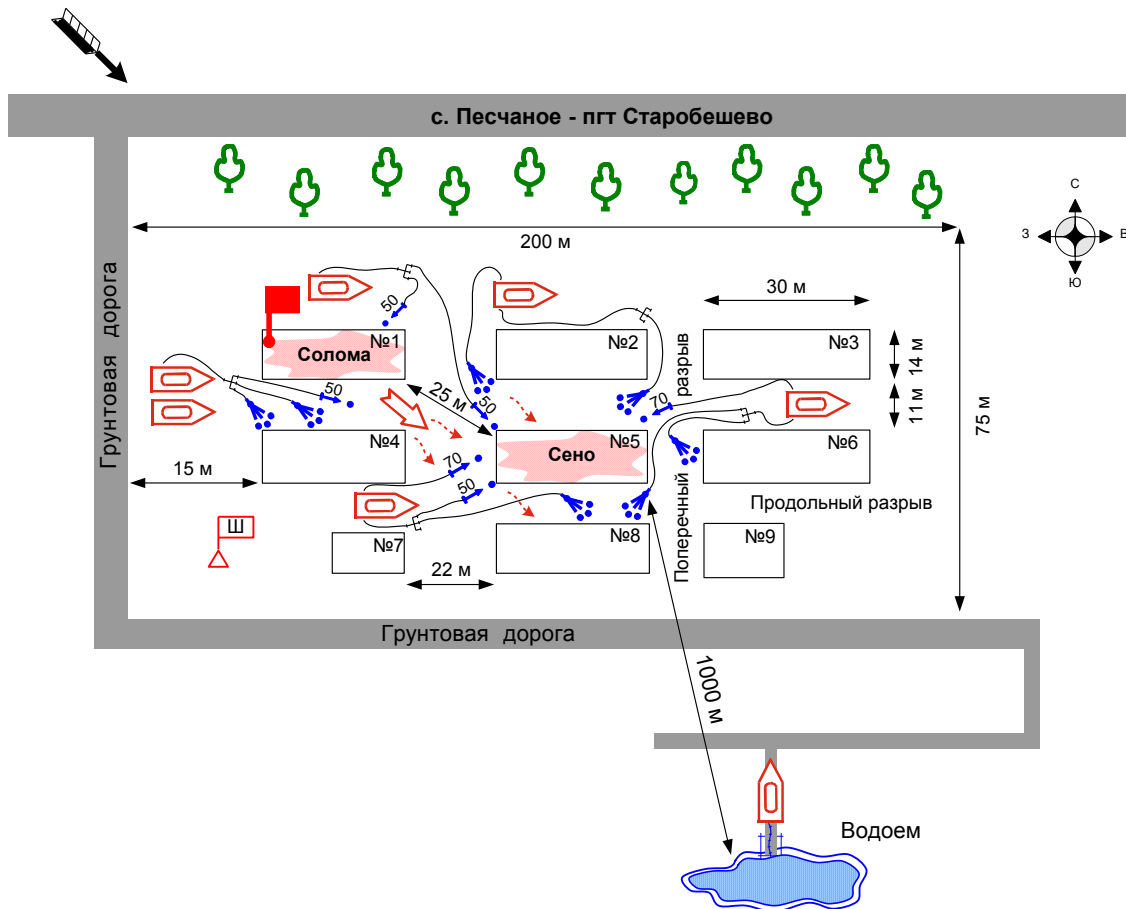


Рис. 3. План-схема расстановки сил и средств при локализации пожара водяными завесами

**Выводы**

Общее количество установок для локализации пожара  $n_{уст} = 7$ .

Они заменят пять стволов Б (DN 50) и два ствола А (DN 70), ранее задействованных (см. рис. 1).

Таким образом, экономия расхода воды равна

$$\Delta Q_{в} = q_{вА}n_{А} + q_{вБ}n_{Б} - q_{вуст}n_{уст} = 5,2 \text{ л/с} = 18,72 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Кроме того, освободившийся один боевой расчет может быть задействован для тушения пожара.

## Список литературы / References

1. Цап, В.Н. Пожарная безопасность животноводческих комплексов / В.Н. Цап // Переработка и управление качеством сельскохозяйственной продукции: сб. ст. III Междунар. науч.-практ. конф. – Минск, 2017. – С. 359 – 361.

Tsap, V.N. *Pozharnaya bezopasnost' zhivotnovodcheskikh kompleksov* [Fire safety of stockbreeding complexes]. *Pererabotka i upravleniye kachestvom sel'skokhozyaystvennoy produktsii: sb. st. III Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Processing and quality control of agricultural products: collected articles of the 3<sup>rd</sup> International theoretical and practical conference]. Minsk, 2017, pp. 359 – 361.

2. Коваль, А.М. Скорость распространения фронта пожара на открытых складах круглых лесоматериалов штабельного хранения / А.М. Коваль // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация: науч.-техн. журн. НИИПБ и проблем ЧС МЧС Республики Беларусь. – 2015. – Вып. № 1(37). – С. 55 – 63.

Koval', A.M. *Skorost' rasprostraneniya fronta pozhara na otkrytykh skladakh kruglykh lesomaterialov shtabel'nogo khraneniya* [Velocity of flame front propagation in ground storages of round timbers storing in stacks]. *Chrezvychnyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya: nauch.-tekhn. zhurn. NIIPB i problem ChS MChS Respubliki Belarus' – Emergency situations: prevention and elimination: scientific-technical journal of the NIIPB and problems of emergency situations of the Ministry of Emergency Situations (Republic of Belarus)*, 2015, issue no. 1(37), pp. 55 – 63.

3. Коваль, О.М. Моделювання розвитку та поширення пожежі на відкритих складах пиломатеріалів / О.М. Коваль // Науковий вісник НЛТУ України. – 2013. – Вип. 23.10.– С. 303 – 313.

Koval', O.M. *Modeliuvannia rozvytku ta poshyrennia pozhezhi na vidkrytykh skladakh pilomaterialiv* [Modeling of development and propagation of a fire in ground saw timber storages]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific bulletin of the NLTU of the Ukraine*, 2013, issue 23.10, pp. 303 – 313.

4. Коваль, О.М. Експериментальне дослідження тривалості локалізації і гасіння пожеж на відкритих складах пиломатеріалів штабельного зберігання /

О.М. Коваль // Науковий вісник НЛТУ України. – 2016. – Вип. 26.5 – С. 312 – 318.

Koval', O.M. *Eksperymental'ni doslidzhennia tryvalosti lokalizatsii i gasinnia pozhezh na vidkrytykh skladakh pilomaterialiv shtabel'nogo zberigannia* [The experimental investigation of the duration of localization and extinguishing of fires in ground lumber pile storages]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy – Scientific bulletin of the NLTU of the Ukraine*, 2016, issue 26.5, pp. 312 – 318.

5. Коваль, О.М. Моделювання тактики локалізації та гасіння пожеж на відкритих складах лісоматеріалів / О.М. Коваль // Пожежна безпека. – 2015. – № 26. – С. 71 – 85.

Koval', O.M. *Modeliuvannia taktyky lokalizatsii ta gasinnia pozhezh na vidkrytykh skladakh lisomaterialiv* [Modeling of the tactics of localization and extinguishing of fires in ground timber storages]. *Pozhezhna bezpeka – Fire safety*, 2015, no. 26, pp. 71 – 85.

6. Гоман, П.Н. Обеспечение пожарной безопасности пиломатериалов хвойных пород при их открытом складировании / П.Н. Гоман, Е.С. Соболевская // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2016. – Вып. №1(65). – С. 17 – 23. URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения: 06.06.2018).

Goman, P.N., Sobolevskaya, Ye.S. *Obespecheniye pozharnoy bezopasnosti pilomaterialov khvoynykh porod pri ikh otkrytom skladirovanii* [Guaranteeing the fire safety of converted timbers by their ground storage]. *Internet-zhurnal "Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti" – Internet-journal "Technologies of the technogenic safety"*, 2016, issue 1(65), pp. 17-23. (Available at: <http://ipb.mos.ru/ttb>) (accessed 06.06.2018).

7. Копылов, Н.П. Моделирование пожаров на складах лесоматериалов / Н.П. Копылов // Моделирование пожаров и взрывов. – М.: Пожнаука, 2000. – С. 189 – 197.

Kopylov, N.P. *Modelirovaniye pozharov na skladakh lesomaterialov* [Modeling of fires in timber storages]. *Modelirovaniye pozharov i vzryvov* [Modeling of fires and explosions]. Moscow, Pozhnauka, 2000, pp. 189 – 197.

8. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.

Koshmarov, Yu.A. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomeshchenii* [Prognostication of fire hazardous factors in a premise]. Moscow, Akademiya GPS MVD Rossii Publ., 2000, 118 p.

9. Виноградов, А.Г. Методика расчета экранирующих свойств водяных завес / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2014. – Т. 23, № 1. – С. 45 – 56.

Vinogradov, A.G. *Metodika raschyeta ekraniruyushchikh svoystv vodyanykh zaves* [Methods of calculation of water curtain screening properties]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire- and explosion safety*, 2014, vol. 23, no. 1, pp. 45 – 56.

10. Виноградов, А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 7. – С. 73 – 82.

Vinogradov, A.G. *Pogloshcheniye teplovogo izlucheniya vodyanymi zavesami* [Absorption of heat radiation with water curtains]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – *Fire- and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 73 – 82.

11. Виноградов, А.Г. Поглощение теплового излучения водяными завесами. Ч. 2 / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 4. – С. 72 – 84.

Vinogradov, A.G. *Pogloshcheniye teplovogo izlucheniya vodyanymi zavesami* [Absorption of heat radiation with water curtains]. Part 2. *Pozharovzryvobezopasnost'* – *Fire- and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 72 – 84.

12. Виноградов, А.Г. Экранирование теплового излучения полидисперсными водяными завесами / А.Г. Виноградов // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 6. – С. 74 – 84.

Vinogradov, A.G. *Ekranirovaniye teplovogo izlucheniya polidispersnymi vodyanymi zavesami* [Screening of heat radiation with polydisperse water curtains]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – *Fire- and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 6, pp. 74 – 84.

13. Булва, А.Д. Применение водяных завес для ограничения распространения опасных примесей в атмосфере / А.Д. Булва // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 9. – С. 74 – 83.

Bulva, A.D. *Primeneniye vodyanykh zaves dlya ogranicheniya rasprostraneniya opasnykh primesey v atmosphere* [Use of water curtains for limitation of distribution of hazardous impurities in the atmosphere]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – *Fire- and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 9, pp. 74 – 83.

14. Булва, И.В. Применение дренчерной водяной завесы в качестве противопожарной преграды / И.В. Булва, А.П. Еремин, А.Д. Булва // Чрезвычайные ситуации: предотвращение и ликвидация. – 2016. – № 2(40). – С. 42 – 47.

Bulva, I.V., Yeryomin, A.P., Bulva, A.D. *Primeneniye drenvernoy vodyanoy zavesy v kachestve protivopozharnoy pregrady* [Use of a drencher water curtain as a fire stop]. *Chrezvychaynyye situatsii: predotvrashcheniye i likvidatsiya* – *Emergency situations: prevention and elimination*, 2016, no. 2(40), pp. 42 – 47.

**Andrey Yuryevich Kolyada**, head of department, e-mail: [kolyada1980@mail.ru](mailto:kolyada1980@mail.ru)

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-39;

**Dmitry Valeryevich Reutov**, chief assistant of the shiftman on duty; e-mail: [reutov74@yandex.ua](mailto:reutov74@yandex.ua)

The Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters

283050, Donetsk, 60, ulitsa Shchorsa. Phone (+38 062) 340-62-28;

**Igor Feliksovich Dikenshteyn**, scientific associate; e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@mail.ru);

**Darya Fyodorovna Balta**, scientific associate; e-mail: [balta\\_daria@mail.ru](mailto:balta_daria@mail.ru)

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

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

## LOCALIZATION OF FIRES IN GROUND AGRICULTURAL FEED STORAGE

**Purpose.** Creation of the methods of calculation of water curtains parameters being used for effectiveness increase of localization and extinguishing of the fires in the ground agricultural feed storages.

**Methods.** Analytical investigations and mathematical calculations of the parameters of a fire and water curtains being used for screening and elimination of the fires.

**Results.** The fires in the ground objects for storage of hay, straw and feeds have been studied. The calculation of the principal parameters of development and propagation of the fires taking into account dimensions of the hay (straw) stacks, fire breaks between the stacks, influence of the wind velocity and its direction on the position of the flame in the space has been fulfilled. The methods of calculation of the water curtains parameters permitting to adopt the optimum tactical plan of placement of fire-prevention forces and means depending on the fire conditions have been worked-out. The evaluation of the application efficiency of the methods has been given by way of the “Бус-1” water fire-extinguishing installation worked out by the NIIGD “Respirator” of the Ministry of Emergency Situations (Donetsk People’s Republic).

**Scientific novelty.** Application of the methods of calculation of the density of heat flows for timber adapted to the agricultural feed storages.

**Practical value.** The use of the devices for creation of the water curtains reduces considerably the water consumption for fire-extinguishing, decreases the physical loads for fire-extinguishing participants and shortens the fire damage to property, what promotes the strengthening the nutritive base of the animal husbandry of the Republic.

**Keywords:** *fire; stack; straw; hay; heat flow; localization; screening; water curtain; attenuation coefficient; efficiency.*

**УДК 543.544:547.21-022.532**

*Алексей Андреевич Козлитин, нач.отд.; e-mail: [kozlitin1942@mail.ru](mailto:kozlitin1942@mail.ru);*

*Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: [lebedenish@mail.ru](mailto:lebedenish@mail.ru);*

*Игорь Николаевич Непочатых, науч. сотр.; e-mail: [tamdoka@mail.ru](mailto:tamdoka@mail.ru);*

*Тамара Михайловна Лукомская, ведущий инж.; e-mail: [tmchromik@mail.ru](mailto:tmchromik@mail.ru)*

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

## **ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИЙ МЕТОД ОБНАРУЖЕНИЯ НАНОКОНЦЕНТРАЦИЙ НЕФТЕПРОДУКТОВ**

**Цель работы.** Создание хроматографического метода, отличающегося высокой чувствительностью обнаружения остатков легковоспламеняющихся светлых нефтепродуктов (бензина и керосина) в пробах, отобранных с места пожара.

**Методы.** Экспериментальные исследования с применением газожидкостной и газо-адсорбционной хроматографии, сравнительный анализ полученных результатов.

**Результаты.** Проведены сравнительные исследования различных адсорбентов: пористого и кварцевого стекла, а также инертных твёрдых носителей: хроматона N-AW и инерттона AW-DMCS. Исследован ряд неподвижных жидких фаз различной полярности и химической природы. Экспериментальным путём показано, что лучшей способностью к формированию суммарного пика предельных углеводородов и отделения его от пиков ароматических углеводородов обладает неполярный сорбент. Установлены критерии идентификации бензина и керосина: время выхода суммарного пика и отпечаток групповой хроматограммы.

**Научная новизна.** Впервые разработан экспрессный, доступный и высокочувствительный метод обнаружения следовых количеств бензина и керосина в пробах, отобранных после пожара. Этот метод не требует традиционно используемых в мировой практике жидкостной экстракции и концентрирования проб, назван он «аккумулятивной хроматографией». В ходе разработки метода определён сорбент, свойства которого позволили получить суммарный пик предельных углеводородов и отделить его от пиков ароматических углеводородов, и тем самым на два-три порядка повысить чувствительность относительно известных методов пожарных исследований.

**Практическая значимость.** Высокая чувствительность метода аккумулятивной хроматографии позволяет определять наноконцентрации бензина ( $5,9 \cdot 10^{-11}$  г/см<sup>3</sup>) и керосина ( $5,0 \cdot 10^{-11}$  г/см<sup>3</sup>) в пробах, отобранных после пожара. Кроме высокой чувствительности, метод аккумулятивной хроматографии имеет ряд других несомненных преимуществ перед иными методами исследований. Эти преимущества: простота исполнения – исследования проводят с использованием одной хроматографической колонки в изотермическом режиме, без предварительной подготовки проб (экстракция, концентрирование), оперативность (время анализа 88 с), надёжная идентификация по временам выхода суммарного пика предельных углеводородов бензина и керосина, а также отпечатку их групповых хроматограмм.

Перечисленные характеристики разработанного метода полностью соответствуют современным требованиям проведения пожарно-технических экспертиз при расследовании причин возникновения пожаров.

**Ключевые слова:** аккумулятивная хроматография; бензин; керосин; наноконцентрация; критерий идентификации; отпечаток групповой хроматограммы; порог обнаружения; сорбент.

**Постановка проблемы.** Легковоспламеняющиеся нефтепродукты широко используют в различных областях экономики и в быту, что неизбежно

влечёт за собой риск возникновения такой чрезвычайной ситуации, как пожар. Особую опасность, в силу криминального характера, представляют умышленные поджоги.

В качестве средств поджога в основном используют наиболее распространённые и доступные населению легковоспламеняющиеся светлые нефтепродукты: автомобильный бензин и керосин. Поэтому именно эти легковоспламеняющиеся нефтепродукты часто оказываются объектами пожарно-технических исследований с целью установления причин возникновения и развития пожаров.

Пожарно-технические исследования предусматривают обнаружение остатков легковоспламеняющихся нефтепродуктов и их последующую идентификацию. Задачи пожарно-технических исследований особенно усложняются, когда необходимо за короткий промежуток времени и с высокой эффективностью провести исследования нефтепродуктов, находящихся в следовых количествах на различных носителях (ткань, древесина, грунт и др.), а также правильно определить тип нефтепродукта. Так, например, не представляется возможным достаточно надёжно идентифицировать остатки бензина, керосина и растворителей нефтяной природы (бензин «Калоша», уайт-спирит, сольвенты и др.) в пробах, отобранных после пожара.

В этих случаях особенно важными являются такие характеристики метода исследования, как селективность и высокая чувствительность. С этой целью широко используется газовая хроматография, которая является наиболее информативным и распространённым методом исследования сложных многокомпонентных смесей.

Однако методы разделения, используемые в классической газовой хроматографии, для решения задач пожарно-технических исследований малопригодны из-за недостаточной чувствительности и длительности процесса, достигающей суток. В связи с этим возникла необходимость найти другие методы обнаружения нефтепродуктов, находящихся в крайне низких наноконцентрациях (ниже  $10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>) в пробах, отобранных с места пожара.

**Анализ последних исследований.** На сегодняшний день при установлении причин возникновения пожаров исследования проб проводят комплексно, используя хроматографические и спектрометрические методы анализа [1–3].

Комплексные схемы исследований реализуются с применением довольно дорогостоящего аналитического оборудования: инфракрасного спектрометра Фурье, газохроматографических систем с программно-аппаратными комплексами, термодесорбционными, пиролитическими приставками и устройствами анализа равновесной паровой фазы и др. Кроме того, перечисленные методы требуют экстракции и концентрирования, что неизбежно приносит в исследуемые пробы неустраняемые, побочные продукты, искажающие результаты пожарных исследований.

Из этого следует необходимость разработки доступного и экспрессного метода, с низкими порогами обнаружения остатков нефтепродуктов в пробах, отобранных после пожара.

**Цель** настоящей работы – создание высокочувствительного метода обнаружения следовых количеств (на уровне наноконцентраций) бензина и керосина в пробах, отобранных после пожара, и установление критериев их идентификации.

**Изложение основного материала.** Поставленная цель требует последовательного решения следующих задач:

- повысить чувствительность метода (ниже  $10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>) путём разработки сорбента, свойства которого обеспечат получение суммарного сигнала за счёт равного массообмена между фазами;
- добиться избирательного концентрирования предельных углеводородов в единый пик и отделения его от пиков ароматических углеводородов для получения хроматографических «отпечатков пальцев»;
- установить критерии идентификации бензина и керосина.

#### Разработка сорбента

Проанализировав физико-химические и структурные свойства существующих сорбентов и твёрдых носителей, для дальнейших исследований выбраны пористое и кварцевое стекло, хроматон N-AW и инертон AW-DMCS.

Указанные твёрдые носители имеют удельную поверхность 0,4...1,0 м<sup>2</sup>/г, которая достаточна для создания равномерной плёнки неподвижной фазы оптимальной толщины. Такая толщина плёнки обеспечивает наибольшее значение коэффициента массопередачи. Размер зёрен исследуемых твёрдых носителей выбран 0,250...0,315 мм.

Выбор неподвижной фазы основан на данных об углеводородном составе и химической природе компонентов бензина и керосина, диапазоне их температур кипения, а также на избирательном получении суммарного пика предельных углеводородов и отделении его от пиков индивидуальных ароматических углеводородов. Важнейшими характеристиками неподвижных жидких фаз в газовой хроматографии являются селективность и полярность. Исходя из полярности и основных свойств неподвижных фаз: стойкости к окислению, термической стойкости, растворимости в органических растворителях – для дальнейших исследований выбраны две неполярные фазы разного состава: малополярная и фаза средней полярности.

Исследования проводили на газовом хроматографе модели 3700 с насадочной стальной колонкой длиной 3 м и диаметром 2 мм. Детектирование осуществлялось пламенно-ионизационным детектором.

В настоящей работе оптимальными условиями хроматографирования приняты: температура термостата колонок (изотермический режим) 130 °С, температура детектора 190 °С, температура испарителя 200 °С. Газ-носитель – гелий, объёмный расход газа-носителя 30 мл/мин, расход воздуха 300 мл/мин,

расход водорода 30 мл/мин. Твёрдые носители – хроматон N-AW и инертон AW-DMCS, адсорбенты – пористое и кварцевое стекло фракции 0,250...0,315 мм.

Используя указанные твёрдые носители и неподвижные фазы различной полярности, для проведения экспериментов были приготовлены шесть хроматографических колонок (табл. 1).

Таблица 1

Состав хроматографических колонок

Номер колонки	Инертный твёрдый носитель	Неподвижная жидкая фаза, массовая доля твёрдого носителя
1	Инертон AW-DMCS	10 % неполярной фазы
2	Хроматон N-AW	5 % малополярной фазы
3	Пористое стекло	Без нанесения жидкой фазы
4	Кварцевое стекло	Без нанесения жидкой фазы
5	Хроматон N-AW	15 % неполярной фазы
6	Хроматон N-AW	15 % фазы средней полярности

Учитывая структурные характеристики, пористость и удельную поверхность, пористое и кварцевое стекло использовали без нанесения жидкой фазы.

В качестве объектов исследования взяты образцы керосина и бензина.

В результате газохроматографических исследований на приготовленных колонках (см. табл. 1) получены хроматограммы керосина и бензина.

Из полученных хроматограмм чёткое групповое разделение углеводородов керосина обеспечивает неполярный сорбент (колонка 1) и кварцевое стекло (колонка 4).

На хроматограммах (рис. 1, 2), полученных с применением этих сорбентов, присутствует узкий и достаточно высокий суммарный пик предельных углеводородов. На колонке с сорбентом малой полярности, пористым стеклом, неполярным сорбентом и сорбентом средней полярности нет формирования суммарного пика предельных углеводородов и отделения его от пиков индивидуальных ароматических углеводородов, так как при заданных условиях анализа происходит деление керосина на индивидуальные компоненты.

Аналогичным образом происходит деление на исследуемых колонках углеводородов бензина. Групповой выход предельных углеводородов бензина обеспечивает колонка на неполярном сорбенте (рис. 3) и кварцевом стекле (рис. 4).

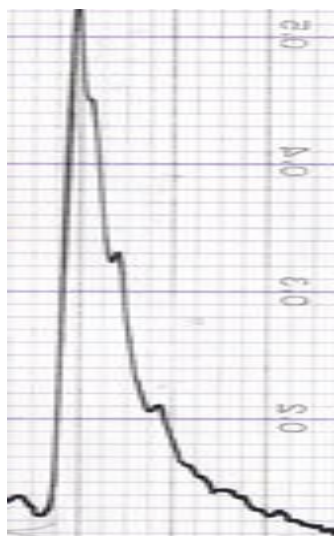


Рис. 1. Хроматограмма керосина на неполярном сорбенте (колонка 1)

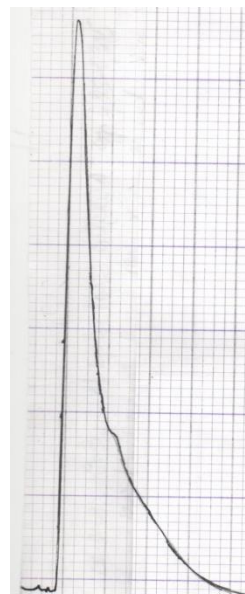


Рис. 2. Хроматограмма керосина на кварцевом стекле (колонка 4)

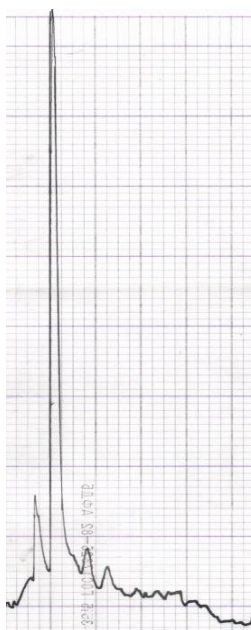


Рис. 3. Хроматограмма бензина на неполярном сорбенте (колонка 1)

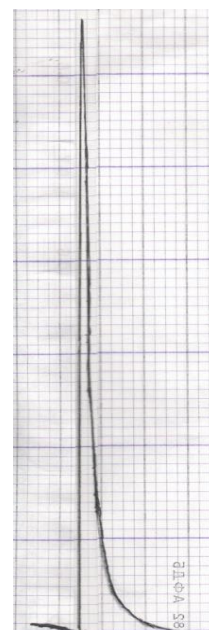


Рис. 4. Хроматограмма бензина на кварцевом стекле (колонка 4)

Следует отметить, что на кварцевом стекле (колонка 4) при заданных условиях эксперимента наблюдается выход несорбированного компонента, т.е. анализируемое вещество не сорбируется поверхностью адсорбента, предельные

и ароматические углеводороды бензина и керосина не разделяются, а регистрируются на хроматограммах (см. рис. 2 и 4) одним неразделённым пиком.

Такой результат можно объяснить особенностями структурных свойств кварцевого стекла, отсутствием его пористости. Поэтому кварцевое стекло в качестве адсорбента для идентификации нефтепродуктов использовать нецелесообразно.

#### Установление критериев идентификации бензина и керосина

Специфика количественного и качественного углеводородного состава бензина, а именно преобладание лёгких предельных углеводородов от пентана до декана и керосина – от октана до додекана, обуславливают различие во временах выхода суммарного пика, образованного этими предельными углеводородами и служат для идентификации нефтепродуктов.

В табл. 2 приведены идентификационные критерии бензина и керосина, которые исследованы на разработанном неполярном сорбенте (колонка 1).

Таблица 2

#### Идентификационные критерии бензина и керосина

Идентификационный критерий	Бензин	Керосин
Углеводородный состав суммарного пика	Предельные углеводороды с количеством атомов углерода от 5 (пентан) до 10 (декан)	Предельные углеводороды с количеством атомов углерода от 8 (октан) до 12 (додекан)
Время выхода суммарного пика предельных углеводородов на хроматограмме, с	26	38
Отпечаток групповой хроматограммы	Суммарный пик предельных углеводородов, отделённый от индивидуальных пиков ароматических углеводородов (см. рис. 3)	Суммарный пик предельных углеводородов невысокий с двумя вершинами, отделённый от индивидуальных пиков ароматических углеводородов (см. рис. 1)

Таким образом, по времени выхода суммарного пика предельных углеводородов бензина (26 с) и керосина (38 с) можно определить, к какому виду нефтепродукта (бензину или керосину) относится анализируемая проба.

Из сопоставления групповых хроматограмм керосина (см. рис. 1) и бензина (см. рис. 3) видно, что они специфичны и отличаются внешним видом хроматограмм, подобно отпечаткам пальцев, поэтому отпечаток групповой хроматограммы принят в качестве критерия идентификации бензина и керосина.

**Выводы.** Разработан доступный и экспрессный хроматографический метод с высокой чувствительностью обнаружения наноконцентраций бензина ( $5,9 \cdot 10^{-11}$  г/см<sup>3</sup>) и керосина ( $5,0 \cdot 10^{-11}$  г/см<sup>3</sup>) в пробах, отобранных после пожара.

Критериями надёжной идентификации приняты время выхода пика предельных углеводородов бензина, образованного суммой предельных углеводородов от пентана (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>) до гептана (C<sub>7</sub>H<sub>16</sub>) и керосина – от октана (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) до декана (C<sub>10</sub>H<sub>22</sub>), а также отпечаток групповой хроматограммы бензина и керосина.

#### Список литературы / References

1. Методология судебной пожарно-технической экспертизы: основные принципы. – М.: ФГБУ ВНИИПО. – 2013. – 23 с.

*Metodologiya sudebnoy pozharno-tekhnicheskoy ekspertizy: osnovnyye printsipy* [Methodology of the judicial fire-technical expert examination: basic principles]. Moscow, FGBU VNIPO Publ., 2013, 23 p.

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

Yegorikov, P.N., Bel'shina, Yu.N., Sharapov, S.V., Arkhipov, M.I. *Ustanovleniye individual'nykh kharakteristik sostava nefteproduktov metodami sistemnogo analiza* [Ascertainment of individual characteristics of the oil products formulation by systems analysis methods]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of management of risks in the technosphere*, 2013, no. 1, pp. 23 – 32.

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

Vorontsova, A.A., Kalashnikov, D.V., Lipskiy, A.A., Esatov, O.A. *Problemy i perspektivy ispol'zovaniya pozharno-tekhnicheskimi spetsialistami sovremennykh sposobov obnaruzheniya i issledovaniya sredstv dlya podzhoga* [Problems and prospects of the use of modern methods for arson means detection and investigation

by fire-technical specialists]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii* [Bulletin of the Voronezh Institute of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations (Russia)]. 2017, no. 2(23), pp. 72 – 77.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 13.08.2018

*Aleksey Andreyevich Kozlitin*, head of department; e-mail: [kozlitin1942@mail.ru](mailto:kozlitin1942@mail.ru);

*Viktoria Valentinovna Lebedeva*, senior scientific associate; e-mail: [lebedenish@mail.ru](mailto:lebedenish@mail.ru);

*Igor Nikolayevich Nepochatykh*, scientific associate; e-mail: [tamdoka@mail.ru](mailto:tamdoka@mail.ru);

*Tamara Mikhaylovna Lukomskaya*, advanced engineer; e-mail: [tmchromik@mail.ru](mailto:tmchromik@mail.ru)

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-55

## CHROMATOGRAPHIC METHOD FOR DETECTION OF NANOCONCENTRATIONS OF OIL PRODUCTS

**Purpose.** Creation of the chromatographic method distinguishing itself by a fast response for detection of trace quantities of highly inflammable light oil products (gasoline and kerosene) in the samples taken from a fire-place.

**Methods.** Experimental studies with the use of the gas-liquid and gas-adsorption chromatography, comparative analysis of the obtained results.

**Results.** The comparative studies of various adsorbates, i.e. porous and quartz glass, as well as inert solid supports, i.e. chromatone N-AW and inertone AW-DMCS, have been conducted. A number of static liquid phases of different polarity and chemical nature have been investigated. It has been experimentally demonstrated that a nonpolar sorbate possesses the best ability to form the total peak of saturated hydrocarbons and to separate it from the peaks of aromatic hydrocarbons. The criteria for the gasoline and kerosene identification have been determined: time of the total chromatographic peak formation and imprint of the group chromatogram.

**Scientific novelty.** For the first time an available and fast response express method has been created to detect the gasoline and kerosene trace quantities in the samples taken after the fire. This method doesn't require the liquid-liquid extraction and concentration of the samples traditionally used in the world practice, it is called “accumulative chromatography”. During the working-out of this method the sorbate has been detected which properties allowed obtaining the total peak of saturated hydrocarbons and its separating from the peaks of aromatic hydrocarbons and thus increasing the response by two-three orders in comparison with the known methods of fire investigations.

**Practical value.** The fast response of the accumulative chromatography method permits to identify the nanoconcentrations of gasoline ( $5.9 \cdot 10^{-11} \text{g/cm}^3$ ) and kerosene ( $5.0 \cdot 10^{-11} \text{g/cm}^3$ ) in the samples taken after the fire. Aside from the fast response the accumulative chromatography method has a whole number of another undeniable advantages comparing with other methods of investigations. These advantages are: simplicity of execution – the investigations are conducted with the use of only one chromatographic column in the isothermal mode in the absence of preliminary preparation of the samples (extraction, concentration), efficiency (the testing time is 88 sec), reliable identification on the times of formation of the total chromatographic peak of saturated hydrocarbons gasoline and kerosene and on imprint of their group chromatograms.

The listed characteristics of the created method completely correspond with the modern requirements for conduction of fire-technical expert examinations during investigation of causes of origin of the fires.

**Keywords:** *accumulative chromatography; gasoline; kerosene; nanoconcentration; criterion for identification; imprint of group chromatogram; detection threshold; sorbate.*

**УДК 543.544.3:547.21**

*Алексей Андреевич Козлитин, нач. отд.; e-mail: [kozlitin1942@mail.ru](mailto:kozlitin1942@mail.ru);*

*Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: [lebedenish@mail.ru](mailto:lebedenish@mail.ru);*

*Игорь Николаевич Непочатых, науч. сотр.; e-mail: [tamdoka@mail.ru](mailto:tamdoka@mail.ru);*

*Тамара Михайловна Лукомская, ведущий инж.; e-mail: [tmchromik@mail.ru](mailto:tmchromik@mail.ru)*

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

## **ИДЕНТИФИКАЦИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ АЛКАНОВ**

**Цель.** Разработка метода с высокой чувствительностью обнаружения следовых количеств индивидуальных алканов (предельных углеводородов) и их смесей для дальнейшей идентификации легковоспламеняющихся и горючих жидкостей нефтяного происхождения при пожарно-технических исследованиях.

**Методы.** Исследования проведены с применением метода аккумулятивной хроматографии сложных углеводородных смесей, методов газожидкостной и газоадсорбционной хроматографии менее сложных по составу веществ, метода сравнения хроматограмм проб неизвестного состава с хроматограммами стандартных веществ.

**Результаты.** Изучена возможность использования алканов как группы углеводородов, типичной для нефтепродуктов, в качестве идентификационных характеристик инициаторов горения нефтяного происхождения. Разработан метод с высокой чувствительностью обнаружения алканов, который позволяет идентифицировать инициатор горения, установить его тип: продукт переработки нефти или жидкость не нефтяного происхождения, сложное или простое вещество, – повышая тем самым достоверность выводов пожарно-технических исследований. Определено время выхода индивидуальных алканов от пентана до октана и их изомеров на сорбентах различного химического состава и полярности. Установлены критерии идентификации инициаторов горения, содержащих алканы: время выхода пика и отпечаток групповой хроматограммы.

**Научная новизна.** Впервые разработан метод, который отличается высокой чувствительностью обнаружения алканов и их изомеров – на уровне наноконцентраций  $10^{-10}$  г/см<sup>3</sup>, не требующий традиционно используемых в мировой практике жидкостной экстракции и концентрирования проб. Впервые алканы нормального и изомерного строения рассматриваются как тестовые соединения на наличие в пробах, отобранных после пожара, инициаторов горения нефтяного происхождения. Изучение алканов для решения задач пожарно-технических исследований является новой, ранее не рассматривавшейся в этой области проблемой.

**Практическая значимость.** Метод исключил применение сложных, затратных и продолжительных во времени спектрометрических и традиционных хроматографических методов при исследовании причин возникновения пожаров, требующих проведения экстракции и концентрирования проб. Сочетание высокой чувствительности метода с экспрессностью и простотой исполнения позволяет оперативно проводить анализ представленных на пожарно-технические исследования объектов, изъятых с места пожара. Создана библиотека хроматограмм наиболее распространенных инициаторов горения – нефтепродуктов и растворителей нефтяного происхождения. Сформированная библиотека хроматограмм существенно расширила возможности идентификации инициаторов горения.

**Ключевые слова:** алканы; время выхода; критерий идентификации; метод аккумулятивной хроматографии; наноконцентрация; порог обнаружения; сорбент; хроматограмма.

**Постановка проблемы.** Основными объектами пожарно-технических исследований были, и в большинстве своем остаются, широко распространенные и доступные для поджигателей продукты переработки нефти: бензин, керосин и дизельное топливо. Кроме перечисленных нефтепродуктов, при поджогах часто используют органические растворители БР-1 и БР-2, бензин «Калоша», уайт-спирит, жидкости для розжига дров и каминов, а также смесевые разбавители лаков, красок, эмалей, клеев, мастик и др.

Продукты переработки нефти содержат множество групп и видов углеводородов (алифатические, ароматические, циклические, предельные, непредельные и др.). Изучение подобных многокомпонентных углеводородных смесей является сложной задачей, особенно при пожарно-технических исследованиях проб, отобранных с места пожара. Поэтому для обнаружения и дальнейшей идентификации следовых количеств инициаторов горения целесообразно изучение определенной группы углеводородов, типичной для всех нефтепродуктов.

Как упоминалось выше, потенциальными средствами поджога остаются товарные нефтепродукты, растворители и другие доступные горючие жидкости, в состав которых в тех или иных количествах входят алканы – алифатические предельные углеводороды. Поэтому обнаружение именно этой группы углеводородов может быть использовано в качестве своеобразного теста на наличие остатков инициаторов горения в пробах, отобранных после пожара. Физико-химические свойства алканов: температура кипения, летучесть паров, полярность молекулы, химическая инертность на фоне других углеводородов – позволяют выделить их в качестве тестовых для надежной идентификации инициаторов горения нефтяного происхождения.

**Анализ последних исследований.** В мировой практике расследования пожаров, связанных с поджогами, для обнаружения и установления состава остатков легковоспламеняющихся нефтепродуктов многие исследователи [1–4] отдают предпочтение методу флуоресцентной спектроскопии, который позволяет обнаруживать различные типы ароматических углеводородов: моноциклические, бициклические, трициклические и полициклические. Однако существуют проблемы, ограничивающие возможности данного метода при исследовании проб, изъятых с мест пожара, как правило, это низкая селективность и недостаточная чувствительность определений. Метод флуоресцентной спектроскопии применим только для органических соединений, молекулы которых способны к флуоресценции, т.е. испускать свет под воздействием света видимого и ультрафиолетового диапазона. Неполярные молекулы алифатических предельных углеводородов не обладают способностью флуоресцировать. Поэтому метод флуоресцентной спектроскопии не эффективен для обнаружения и идентификации остатков инициаторов горения, содержащих алканы: нефтяных растворителей, жидкостей для розжига дров, углей, каминов и др. Эти проблемы могут быть

устранены только с помощью использования эффективных методов газовой хроматографии.

Газовая хроматография является универсальным методом для анализа веществ неизвестного состава, изъятых с места пожара, при пожарно-технических исследованиях. В то же время для успешного решения разнообразных практических проблем в области пожарно-технических исследований, связанных с применением газовой хроматографии, недостаточно использовать разработанные ранее методики. Применение различных вариантов газовой хроматографии, правильный выбор схемы анализа, сорбента, температуры позволяют в каждом случае находить наиболее рациональный путь решения поставленной задачи, что обуславливает актуальность данного исследования.

**Цель** настоящей работы – изучение возможности использования алканов в качестве идентификационных характеристик инициаторов горения и разработка метода газовой хроматографии с низкими порогами обнаружения алканов, на уровне наноконцентраций (ниже  $10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>), в пробах, изъятых с места пожара.

**Изложение основного материала.** Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- повысить чувствительность метода (на уровне концентраций ниже  $10^{-9}$  г/см<sup>3</sup>) путем разработки сорбента, свойства которого обеспечат получение группового пика, содержащего алканы, за счет примерно равного массообмена между фазами;
- добиться отделения сформированного группового пика алканов от пиков ароматических углеводородов для получения хроматографических «отпечатков пальцев» за счет избирательных свойств сорбента;
- установить критерии идентификации нефтепродуктов.

В хроматографии разделительная способность или эффективность колонки измеряется числом теоретических тарелок  $n$  и высотой, эквивалентной теоретической тарелке,  $H$ .

Рассмотрим разделительную способность хроматографических колонок с кинетической точки зрения по основному уравнению газовой хроматографии, предложенному Ван-Деемтером [5]:

$$H = 2\lambda d_p + 2\frac{\gamma D_G}{u} + \frac{8}{\pi^2} \frac{k}{(1+k)^2} \frac{d_f^2}{D_F} u, \quad (1)$$

где  $H$  – высота, эквивалентная теоретической тарелке, м;

$\lambda$  – статистическая неоднородность набивки колонки;

$d_p$  – диаметр частиц твердого носителя жидкой фазы, мм;

$\gamma$  – коэффициент извилистости каналов пор;

$D_G$  – коэффициент молекулярной диффузии в газовой фазе, м<sup>2</sup>/с;

$k$  – коэффициент удерживания;

$d_f$  – средняя толщина пленки неподвижной фазы на носителе, м;  
 $D_F$  – коэффициент молекулярной диффузии в жидкой неподвижной фазе, м<sup>2</sup>/с;  
 $u$  – линейная скорость потока газа-носителя, м/с.

В упрощенной форме уравнение Ван-Деемтера имеет следующий вид:

$$H = A + \frac{B}{u} + Cu, \quad (2)$$

где  $A$  – первое слагаемое уравнения (1), коэффициент, учитывающий степень неоднородности структуры сорбента в колонке;

$B$  – второе слагаемое уравнения (1), коэффициент, учитывающий вклад продольной диффузии анализируемого вещества в подвижной и неподвижной фазах;

$C$  – третье слагаемое уравнения (1), коэффициент, определяющий массообмен между неподвижной и подвижной фазами, учитывающий вклад поперечной диффузии.

Следует указать, что только третье слагаемое уравнения (1) или коэффициент  $C$  выражения (2) характеризует интересующий нас процесс массообмена между неподвижной и подвижной фазами для формирования группового пика.

Коэффициент  $C$  уравнения Ван-Деемтера, который определяет межфазный массообмен, рассчитывают по формуле

$$C = \frac{8}{\pi^2} \frac{k}{(1+k)^2} \frac{d_f^2}{D_F} u. \quad (3)$$

Из формулы (3) вытекает, что массообмен между фазами определяется коэффициентом молекулярной диффузии  $D_F$  молекул анализируемого вещества или смеси в неподвижной фазе, толщиной пленки неподвижной фазы на носителе  $d_f$  и линейной скоростью потока газа-носителя  $u$ . Оптимальное значение скорости потока газа-носителя для формирования группового пика установлено на основании результатов предыдущих исследований [6].

Для молекулярной диффузии в неподвижной фазе наиболее критичны физические свойства неподвижной фазы: вязкость и толщина пленки фазы на носителе. Следовательно, оптимальный межфазный массообмен, который необходим для формирования группового пика алканов, можно получить за счет вязкости жидкой фазы и ее количества на твердом носителе.

Селективное разделение сформированного группового пика алканов и пиков индивидуальных ароматических углеводородов обеспечивают химические свойства неподвижной фазы: химическая природа (строение) и полярность молекул. Химические свойства неподвижной фазы определяются способностью фазы вступать в специфические межмолекулярные взаимодействия: дисперсионные, дипольные, образование водородных связей и

комплексообразование, что обеспечивает необходимое разделение за минимальное время, т.е. полное отсутствие влияния сорбции и взаимодействия с неполярными молекулами алканов.

Исследования по разработке оптимального сорбента основаны на данных о групповом углеводородном составе и химической природе компонентов горючих жидкостей нефтяной природы (бензин, керосин, уайт-спирит, бензиновые растворители и др.), диапазоне их температур кипения, а также на селективном взаимодействии между молекулами алканов, ароматических углеводородов и неподвижной фазой.

Для достижения селективного разделения алканов и ароматических углеводородов жидкая фаза по химическому строению должна быть близка к составным компонентам исследуемого вещества. Из этих соображений для разделения неполярных алканов и малополярных ароматических углеводородов необходимо применять неполярные жидкие фазы.

Для решения поставленных задач изучен ряд адсорбентов: стеклянный бисер, пористое и кварцевое стекло. К преимуществам носителей из стекла как адсорбентов можно отнести их химическую инертность и термическую устойчивость. Исследованы сорбенты на основе инертна AW-DMCS и хроматона N-AW, модифицированные неподвижными жидкими фазами, которые отличаются химической природой, полярностью, вязкостью, и взятые в разных массовых долях от массы твердого носителя (5...15 %).

Исследования проводили на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором и хроматографическими колонками диаметром 2 мм, длиной 2 и 3 м.

Оптимальными условиями хроматографирования примем: температуру термостата колонок (изотермический режим) 130 °С, температуру детектора 190 °С, температуру испарителя 200 °С. Газ-носитель – гелий, объемный расход потока газа-носителя 30 мл/мин, расход воздуха 300 мл/мин и расход водорода 30 мл/мин. Твердые носители – хроматон N-AW, инертон AW-DMCS, адсорбенты – пористое, кварцевое стекло и стеклянный бисер фракцией 0,250...0,315 мм, а также неподвижные фазы различной химической природы и полярности. Используя указанные твердые носители и неподвижные фазы, для проведения экспериментов были приготовлены восемь хроматографических колонок (табл. 1).

Таблица 1

Состав хроматографических колонок

Колонка	Инертный твердый носитель	Неподвижная жидкая фаза (доля массы твердого носителя)
1	Инертон AW-DMCS	10 % углеводородной неполярной фазы
2	Хроматон N-AW	15 % углеводородной неполярной фазы

Окончание табл. 1

Колонка	Инертный твердый носитель	Неподвижная жидкая фаза (доля массы твердого носителя)
3	Хроматон N-AW	5 % силиконовой малополярной фазы
4	Хроматон N-AW	15 % углеводородной фазы средней полярности
5	Хроматон N-AW	10 % полярной фазы
6	Пористое стекло	Без нанесения жидкой фазы
7	Кварцевое стекло	Без нанесения жидкой фазы
8	Стеклянный бисер	Без нанесения жидкой фазы

Объект исследования – группа алканов нормального строения: пентан  $C_5H_{12}$ , гексан  $C_6H_{14}$ , гептан  $C_7H_{16}$ , октан  $C_8H_{18}$  и изомерного строения: изопентан (изомер пентана), 3-метилгексан (изомер гептана), 3-метилгептан и изооктан (изомеры октана). Такой выбор объекта исследования обусловлен тем, что указанные углеводороды являются основными компонентами наиболее доступных для приобретения инициаторов горения: бензина, керосина, дизельного топлива, бензина «Калоша», уайт-спирита и других распространенных нефтяных растворителей.

Для оценки качества разделения алканов нормальной и изомерной структуры, одинаковых по качественному и количественному составу, близких по химическому строению и физическим свойствам [7], таким, как молекулярная масса, температура кипения, плотность (табл. 2), предварительно готовили модельные смеси перечисленных углеводородов.

Таблица 2

## Физические свойства алканов

Алкан	Химическая формула	Молекулярная масса	Температура кипения, °C	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Показатель преломления
Пентан	$C_5H_{12}$	72,15	36,2	626,0	1,3570
Изопентан (изомер пентана)	$C_5H_{12}$	72,15	28,0	619,7	1,3550
Гексан	$C_6H_{14}$	86,18	69,0	660,3	1,3750
Гептан	$C_7H_{16}$	100,20	94,4	683,8	1,3876
3-метилгексан (изомер гептана)	$C_7H_{16}$	100,20	91,8	687,1	1,3886
Октан	$C_8H_{18}$	114,23	125,8	703,6	1,3975
3-метилгептан (изомер октана)	$C_8H_{18}$	114,23	118,0	706,0	1,3980
Изооктан (изомер октана)	$C_8H_{18}$	114,23	117,8	702,0	1,3915

В ходе исследования приготовленных модельных смесей определены времена выхода алканов, рассчитан критерий разделения, а также изучена возможность идентификации наиболее распространенных инициаторов горения нефтяной природы: бензина, керосина, уайт-спирита, бензина-растворителя «Калоша» разных производителей. Для каждой колонки получены отпечатки групповых хроматограмм, определены времена выхода групповых пиков, которые приняты за основные критерии идентификации.

По результатам сравнительного анализа разработан оптимальный сорбент для исследования методом аккумулятивной хроматографии сложных углеводородных смесей, которые содержат алканы. Свойства разработанного сорбента обеспечили избирательное концентрирование алканов и отделение их от ароматических углеводородов за счет примерно равного межфазного массообмена как для алканов, так и отдельно – для группы ароматических углеводородов.

Определен сорбент, который позволил эффективно разделить смеси алканов, что важно для их обнаружения в более простых по составу инициаторах горения. Наилучшая эффективность анализа, которую оценивали по критерию разделения между наихудшим образом разделяемыми компонентами исследуемой смеси: 3-метилгексан – гептан и 3-метилгептан – октан, и временами выхода пиков алканов, достигается на колонке с пористым стеклом длиной 2 м при температуре термостата колонки 130 °С.

Установлены главные критерии идентификации сложных углеводородных смесей, содержащих алканы: время выхода группового пика алканов и отпечаток групповой хроматограммы (аналогично отпечатку пальцев), для более простых углеводородных смесей – времена выхода пиков индивидуальных алканов.

**Выводы.** Разработан метод с низкими порогами обнаружения индивидуальных алканов (на уровне  $10^{-10}$  г/см<sup>3</sup>), а также их смесей в пробах, отобранных после пожара, не требующий традиционно используемых в мировой практике жидкостной экстракции и концентрирования проб.

Изучена возможность использования алканов в качестве идентификационных характеристик инициаторов горения нефтяного происхождения. Показано, что при пожарно-технических исследованиях идентификацию легковоспламеняющихся жидкостей нефтяного происхождения можно проводить методом газоадсорбционной хроматографии простых по составу смесей: бензиновые растворители типа БР-1, БР-2, жидкости для розжига дров, углей и аккумулятивной хроматографии сложных углеводородных смесей: бензин, керосин, дизельное топливо, уайт-спирит и др.

Совместное использование разработанных методов дает более широкую информацию о доле в исследуемой пробе продукта переработки нефти или жидкости не нефтяного происхождения, повышая тем самым достоверность выводов пожарно-технических исследований.

## Список литературы / References

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

Yegorikov, P.N., Bel'shina, Yu.N., Sharapov, S.V., Arkhipov, M.I. *Ustanovleniye individual'nykh kharakteristik sostava nefteproduktov metodami sistemnogo analiza* [Ascertainment of individual characteristics of the oil products formulation by systems analysis methods]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of management of risks in the technosphere*, 2013, no. 1, pp. 23 – 32.

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

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

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

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

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

Printseva, M.Yu., Klapyuk, I.V., Cheshko, I.D. *Primeneniye metoda fluoretsentnoy spektroskopii dlya obnaruzheniya i ustanovleniya sostava legkovosplamenyayushchikhsya i goryuchikh zhidkostey, ispol'zuyemykh pri*

*podzhogakh* [The use of the fluorescence spectroscopy method for detection and determination of the formulation of highly inflammable and combustible liquids being used by arsons]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2010, no. 2, pp. 94 – 99.

5. Байер, Э. Хроматография газов / Э. Байер [Электронный ресурс]. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005956950> (дата обращения: 07.11.2018).

Bayer, E. *Khromatografiya gazov* [Gas chromatography]. [Electronic resource]. Available at: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005956950> (accessed 07.11.2018).

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

Kozlitin, A.A., Lebedeva, V.V., Nepochatykh, I.N., Lukomskaya, T.M. *Vybor sorbenta dlya ekspressnogo opredeleniya gasokhromatograficheskim metodom initsiatorov gorenija v probakh s mesta pozhara* [Choice of a sorbate for express determination of combustion initiators in the samples taken from a fire place using the gas chromatographic method]. *Nauchnyy Vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 40 – 49.

7. Несмеянов, А.Н. Начала органической химии. Кн. 1. / А.Н. Несмеянов, Н.А. Несмеянов [Электронный ресурс]. URL: <http://alleng.org/d/chem/chem73.htm> (дата обращения: 07.11.2018).

Nesmeyanov, A.N., Nesmeyanov, N.A. *Nachala organicheskoy khimii. Kn. 1.* [Principles of organic chemistry. Book 1] [Electronic resource]. Available at: <http://alleng.org/d/chem/chem73.htm> (accessed 07.11.2018).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 08.11.2018

*Aleksey Andreyevich Kozlitin*, head of department; e-mail: [kozlitin1942@mail.ru](mailto:kozlitin1942@mail.ru);

*Viktoria Valentinovna Lebedeva*, senior scientific associate; e-mail: [lebedenish@mail.ru](mailto:lebedenish@mail.ru);

*Igor Nikolayevich Nepochatykh*, scientific associate; e-mail: [tamdoka@mail.ru](mailto:tamdoka@mail.ru);

*Tamara Mikhaylovna Lukomskaya*, advanced engineer; e-mail: [tmchromik@mail.ru](mailto:tmchromik@mail.ru)

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-55

## IDENTIFICATION OF OIL PRODUCTS BY RESULTS OF CHROMATOGRAPHIC INVESTIGATION OF ALKANES

**Purpose.** Working-out the method with fast detection response of trace quantities of individual alkanes (saturated hydrocarbons) and their mixtures for further identification of highly inflammable and combustible liquids of oil origin during fire-technical investigations.

**Methods.** The investigations have been carried out with the use of the accumulative chromatography method of complex hydrocarbon mixtures, of the gas-liquid and gas-adsorption chromatography methods of substances which formulations are less complex, and of the method of comparison of chromatograms of the samples having the unknown formulation with chromatograms of the standard substances.

**Results.** The possibility of the use of the alkanes as a hydrocarbon group that is typical for the oil products in the capacity of identification characteristics of combustion initiators of oil origin has been studied. The method with fast detection response of the alkanes identifying the combustion initiator, determining its type whether it is an oil processing product or a non-petroleum liquid, a complex or a simple substance, thereby raising the trustworthiness of the conclusions of the fire-technical investigations has been worked out. The time of the chromatographic peak formation of the individual alkanes from pentane to octane and of their isomers has been determined on sorbates of various chemical formulation and polarity. The criteria for identification of the combustion initiators containing the alkanes have been ascertained: time of the chromatographic peak formation and imprint of the group chromatogram.

**Scientific novelty.** The method that is notable for fast detection response of the alkanes and their isomers – at the level of nanoconcentrations of  $10^{-10}$  g/cm<sup>3</sup> – that doesn't require the liquid extraction and concentration of the samples being traditionally used in world practice has been worked out for the first time. The alkanes of the normal and isomeric structure are considered for the first time as test compounds available in the samples of the combustion initiators of oil origin taken after the fire. The study of the alkanes to solve the problems of the fire-technical investigations is a new problem that has been not examined earlier in this field.

**Practical value.** The method excluded the application of complicated, cost-based and time-long spectrometric and traditional chromatographic methods during investigation of causes of origin of the fires requiring the extraction and concentration of the samples. The combination of the fast detection of the method with rapidity and implementation simplicity permits to carry out the analysis of objects taken from a site of the fire and presented for the fire-technical investigations efficiently. The chromatogram library of the most widespread combustion initiators, i.e. of oil products and solvents of oil origin, has been created. The generated chromatogram library has considerably widened the possibilities of identification of the combustion initiators.

**Keywords:** *alkanes; time of the chromatographic peak formation; criterion of identification; accumulative chromatography method; nanoconcentration; detection threshold; sorbate; chromatogram.*

### III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК [622.413.3:622.817.47]

*Петр Семенович Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по научной работе; e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru);*

*Николай Викторович Карнаух, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: [avrstla@mail.ru](mailto:avrstla@mail.ru);*

*Александр Викторович Мавроди, инж.; e-mail: [mavrodi-av@mail.ru](mailto:mavrodi-av@mail.ru)*

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

## НОРМАЛИЗАЦИЯ ГАЗОВОГО РЕЖИМА ВЫЕМОЧНОГО УЧАСТКА ПРИ ОТКЛЮЧЕНИИ СИСТЕМЫ ДЕГАЗАЦИИ

**Цель.** Оценить опасность и рост метановыделения, исследовать методы оценки, возможность и способы нормализации газового режима выемочного участка при технологических и аварийных отключениях системы дегазации.

**Методы.** Анализ состояния вентиляции шахт, выемочных участков и дегазационных систем, методов расчета метановыделения при отключении систем дегазации, оценка газовой обстановки на выемочном участке, местных скоплений метана, определение резервов воздуха на этих участках, в вентиляционной сети и на вентиляторах главного проветривания.

**Результаты.** Проанализировано состояние проветривания шахт, выемочных участков и дегазационных систем, показана возможность образования опасных концентраций метана на исходящей струе выемочных участков и в местных скоплениях у бутовых полос, в тупиках погашения вентиляционных выработок и выработанном пространстве, предложены методы оценки и расчета газовой обстановки, необходимого расхода воздуха, методы расчета его резервов и способы их использования для обеспечения безопасности ведения горных, восстановительных и аварийно-спасательных работ при отключении системы дегазации.

**Научная новизна.** Системный подход к расчетам газовой обстановки и нормализации газового режима при отключении системы дегазации, включающий расчет параметров метановыделения, необходимого расхода воздуха и определение резервов воздуха на выемочных участках, в вентиляционной сети и на вентиляторах главного проветривания, а также порядок использования и введения в действие имеющихся резервов.

**Практическая значимость.** Разработаны методы расчета необходимого расхода воздуха для нормализации газового режима на выемочном участке, способы нейтрализации роста метановыделения и обеспечения безопасности работ при отключении системы дегазации.

**Ключевые слова:** *выемочный участок; отключение системы дегазации; оценка газовой обстановки; способы нормализации газового режима; методы расчета необходимого расхода воздуха; резервы воздуха и их определение.*

**Постановка проблемы.** Отключение систем дегазации резко увеличивает поступление метана в выработки участка, его объемную долю, способствует загазованию исходящей струи выемочного участка до взрывоопасных концентраций, что требует нормализации газового режима [1] и необходимости оперативных действий по выводу людей на свежую струю.

**Анализ последних исследований.** Изучение состояния проветривания шахт, выемочных участков, дегазации и газоотсоса, расчет их параметров, выполненных исследований изменения метановыделения, данных по его нарастанию после отключения дегазации во времени [1, 2, 3, 4] показали недостаточную завершенность решения задачи и особенно методов определения резервов воздуха и порядка их введения в действие.

**Цель исследований.** Разработать методы определения газовой обстановки на выемочных участках и способы нейтрализации метановыделения при отключении систем дегазации.

**Материалы и результаты исследований.** Нормализация газового режима на выемочном участке при отключении системы дегазации может быть достигнута за счет:

- заранее поданного резерва воздуха на выемочный участок;
- увеличения подачи воздуха на выемочный участок путем открывания дверей регуляторов расхода воздуха;
- снижения подачи воздуха на второстепенные объекты;
- использования сжатого воздуха для усиления проветривания и, главным образом, для ликвидации местных скоплений метана;
- усиления режима работы вентилятора главного проветривания;
- подключения резервного вентилятора;
- усиления одного из способов дегазации при применении комплексной дегазации и выходе из строя только одного способа.

Дополнительное метановыделение  $\Delta I_d$ , м<sup>3</sup>/мин, определяют по формуле

$$\Delta I_d = k_{вл} I_d, \quad (1)$$

где  $k_{вл}$  – коэффициент, учитывающий влияние дегазации на увеличение расхода капируемого метана; при проектировании принимают равным 0,835 [1, 2, 3].

С учетом эффективности дегазации  $k_{вл}$  определяют по формуле

$$k_{вл} = \frac{1 - k_d}{1,06 - k_d}, \quad (2)$$

где  $k_d$  – коэффициент эффективности дегазации;

$I_d$  – средний расход метана, отводимого дегазацией, м<sup>3</sup>/мин.

Дополнительное выделение метана  $I_{доп}$ , м<sup>3</sup>/мин, который может быть разбавлен до нормируемых концентраций фактически поступающим на участок воздухом, определяют по формуле

$$I_{доп} = 0,01 \bar{Q}_{уч} (C_{доп} - \bar{C}_ф), \quad (3)$$

где  $\bar{Q}_{\text{уч}}$  – средний фактический расход воздуха, поступающего на участок при работающей дегазации, м<sup>3</sup>/мин; определяют по формуле

$$\bar{Q}_{\text{уч}} = \sum_{i=1}^{n_i} Q_i / n_i, \quad (4)$$

где  $Q_i$  – расход воздуха в  $i$ -м измерении, м<sup>3</sup>/мин;  
 $n_i$  – количество измерений расхода воздуха в течение трех месяцев стабильной работы лавы;

$C_{\text{доп}}$  – допустимая средняя объемная доля метана в исходящей вентиляционной струе выемочного участка (принимают 1,0 % для нормальной работы участка и 2,0 % для ведения аварийно-спасательных работ), %;

$C_{\text{ф}}$  – средняя объемная доля метана в исходящей вентиляционной струе выемочного участка при работающей дегазации, %.

Среднюю фактическую объемную долю метана в исходящей вентиляционной струе выемочного участка  $C_{\text{ф}}$  при работающей дегазации определяют по формуле

$$\bar{C}_{\text{ф}} = \sum_{j=1}^{n_j} C_j / n_j, \quad (5)$$

где  $C_j$  – средняя объемная доля метана в  $j$ -м измерении, %;

$n_j$  – количество определений среднесуточной объемной доли метана в течение трех месяцев стабильной работы лавы.

При дополнительном метановыделении  $\Delta I_{\text{д}} \leq I_{\text{доп}}$  созданных запасов расхода воздуха на участке достаточно для обеспечения нормируемой объемной доли метана в исходящей струе.

При  $\Delta I_{\text{д}} \geq I_{\text{доп}}$  требуется увеличить расход воздуха на выемочном участке, например, за счет открывания дверей регулятора.

Открывание дверей регулятора увеличивает расход воздуха в исходящей струе участка на 40...50 % и он может быть определен путем эксперимента или расчетом вентиляционной сети на ЭВМ.

Значение аэродинамического сопротивления выработки с регулятором при его открывании  $R_{\text{в}}$  определяют по формуле

$$R_{\text{в}} = R_{\text{вр}} - R_{\text{р}} + R_{\text{ок}}, \quad (6)$$

где  $R_{\text{вр}}$  – аэродинамическое сопротивление выработки с регулятором, даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>;

$R_{\text{р}}$  – аэродинамическое сопротивление регулятора, даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>;

$R_{ок}$  – аэродинамическое сопротивление проема (окна) при открытой двери регулятора (определяют измерением или по табл. 1), даПа·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>.

Таблица 1

Аэродинамическое сопротивление открытого регулятора расхода воздуха для выработок с различным поперечным сечением

Площадь двери, м <sup>2</sup>	Аэродинамическое сопротивление открытого регулятора, даПа·с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup> , при поперечном сечении выработки, м <sup>2</sup>										
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1,3	67,9	71,0	73,4	75,2	76,7	78,0	79,0	80,0	80,7	81,4	82,0
1,5	54,1	47,6	49,5	51,1	52,3	53,4	54,2	55,0	55,6	55,2	56,7
2,0	22,2	24,0	25,4	26,5	27,4	28,1	28,7	29,3	29,7	30,1	30,5
3,0	7,3	8,4	9,2	9,9	10,4	10,9	11,3	11,6	11,9	12,2	12,4
3,8	1,7	2,6	4,8	5,3	5,7	6,0	6,3	6,6	6,8	7,0	7,2
5,0	1,2	1,6	2,0	2,3	2,6	2,8	3,0	3,2	3,3	3,5	3,6

Полученное в результате измерения или расчетом значение расхода воздуха, поступающего на участок  $Q_{расч}$ , м<sup>3</sup>/мин, при открытой двери регулятора сравнивают с необходимым минимальным расходом воздуха, который определяют по формуле

$$Q_{уч. min} = 100 (I_{уч} + \Delta I_{д}) / C_{доп}. \quad (7)$$

Расчетный расход воздуха для нормальной работы при отключении системы дегазации на продолжительное время (ремонт)  $Q_{уч. расч}$ , м<sup>3</sup>/мин, определяют с учетом коэффициента неравномерности метановыделения по формуле

$$Q_{уч. расч} = 100(I_{уч} + \Delta I_{д})k_n / C_{доп}, \quad (8)$$

где  $k_n$  – коэффициент неравномерности метановыделения.

При  $Q_{расч} \geq Q_{уч. min}$  на участке обеспечена безопасная средняя объемная доля в исходящей струе. При  $Q_{расч} \leq Q_{мин}$  среднюю ожидаемую объемную долю метана в исходящей струе участка  $C_{ср}$ , %, определяют по формуле

$$C_{ср} = \frac{100(I_{уч} + \Delta I_{д})}{Q_{уч. расч}}, \quad (9)$$

где  $Q_{уч. расч}$  – среднее поступление расхода воздуха на выемочный участок при применении мер по его увеличению, м<sup>3</sup>/мин.

При средней объемной доле метана в исходящей струе  $C_{\text{ср}}$  более 1,0 % требуется дальнейшее увеличение подачи воздуха на участок, например, за счет снижения подачи воздуха на второстепенные объекты.

Обеспеченность воздухом второстепенных объектов находится в широких пределах (табл. 2) и позволяет увеличить расход воздуха на участке от 20 до 35 %. Увеличение расхода воздуха на участке определяют расчетом вентиляционной сети на ЭВМ.

Система сжатого воздуха, которую используют для работы отбойных молотков, эжекторов, турбулизаторов воздуха и других целей, в зависимости от производительности применяемых компрессоров может обеспечить дополнительную подачу воздуха на 70...300 м<sup>3</sup>/мин. Параллельное подключение дополнительного трубопровода обеспечивает увеличение подачи воздуха от 270 до 450 м<sup>3</sup>/мин. Остальных потребителей воздуха отключают от магистрали.

Таблица 2

## Аэродинамические параметры второстепенных объектов

Шахта	Сеть ВГП	Расход воздуха для поддерживаемых выработок, м <sup>3</sup> /мин			Расход воздуха для проветривания камер, м <sup>3</sup> /мин			Суммарная доля расхода воздуха, %
		фактический	расчетный	%	фактический	расчетный	%	
«Холодная балка»	ВОД-30М	38,1	17,0	224	4,6	3,2	144	211
	ВЦД-31,5	69,0	38,2	180	6,6	4,4	150	177
«Северная»	ВЦД-3,3	41,5	25,5	163	25,8	19,8	130	146
Им. С.М. Кирова	ВЦД-31,5	135,4	72,3	187	5,0	3,6	139	185
	ВЦ-31,5	81,6	50,6	161	-	-	-	161
«Вергелевская»	ВОД-21	28,8	17,5	164	6,3	6,3	100	147
	ВОД-18	23,2	22,6	103	1,1	4,1	27	91
Им. Г.Г. Капустина	ВЦ-31,5	39,5	27,0	146	2,25	2,96	76	139
Шахтоуправление «Луганское»	ВРЦД-4,5	57,9	22,3	260	37,1	26,8	138	193
	ВЦД-31,5	86,6	36,4	238	37,1	26,4	140	197
«Лутугинская»	ВЦД-31,5М	14,5	8,6	169	169	21,5	226	199
Им. Г.М. Димитрова	ВЦ-31,5	62,5	30,4	205	6,0	6,0	100	188
	ВЦО-3,1	52,0	34,5	151	8,5	4,5	189	155
	ВОКД-3	49,0	23,5	208	3,0	0,9	333	213

Для ликвидации местных скоплений рекомендуют использовать турбулизаторы. Проверку подачи дополнительного воздуха следует производить экспериментально в нерабочие или праздничные дни.

Турбулизаторы воздуха в первую очередь необходимо использовать в районах ведения ремонтных и аварийных работ и наличия источников метановыделения (тупики погашения выработок, сопряжения выработок с лавами, окна в бутовых полосах или изоляторах, в местах бурения скважин и т.п.).



По характеристике вентилятора и вентиляционной сети определяют значение фактической подачи воздуха в шахту. Для этого на ось абсцисс из точки А опускают перпендикуляр и устанавливают фактическую подачу вентилятора  $Q_{\phi 1}$ , м<sup>3</sup>/с. Затем из пересечения аэродинамической характеристики сети с верхней характеристикой вентилятора (точка В) опускают на ось абсцисс второй перпендикуляр и определяют максимальную подачу  $Q_1$ , м<sup>3</sup>/с, вентилятора в сеть.

Резерв воздуха на вентиляторе  $Q_{рез}$ , м<sup>3</sup>/с, в рассматриваемом режиме определяют по формуле

$$Q_{рез} = Q_1 - Q_{\phi 1} . \quad (12)$$

Для вычисления резерва воздуха на выемочном участке используют коэффициент увеличения подачи воздуха  $k_{ув.уч}$ , который можно определять по формуле

$$k_{ув.уч} = Q_1 / Q_{\phi 1} . \quad (13)$$

Расчет резервов воздуха на вентиляторе главного проветривания базируется на предположении, что увеличение расхода воздуха во всех ветвях сети при неизменных ее параметрах пропорционально изменению его расхода на вентиляторе.

При необходимости дальнейшего увеличения подачи воздуха на выемочный участок может быть использовано параллельное включение однотипного резервного вентилятора. Возможный расход воздуха определяется в результате построения суммарной совместной характеристики работы двух вентиляторов (см. рисунок, кривая 2). Для этого последовательно суммируется производительность вентиляторов при одинаковых депрессиях. Затем определяется точка пересечения суммарной характеристики вентиляторов с характеристикой вентиляционной сети (точка С). Опустив из точки С перпендикуляр на ось абсцисс, находят максимальный расход воздуха (точка  $Q_2$ ), подаваемого в шахту при совместной работе вентиляторов. Коэффициент увеличения подачи воздуха и возможный расход воздуха на выемочном участке определяют по формулам (13) и (17).

При недостаточности такого режима оба вентилятора переводят на максимальную характеристику их совместной работы (см. рисунок, кривая 3). Из точки D пересечения характеристик вентиляционной сети и вентилятора опускают перпендикуляр на ось абсцисс, при этом получают новый (точка  $Q_3$ ) максимальный расход воздуха при параллельной работе вентиляторов на данную сеть. В данном режиме работы вентилятора резерв определяют по формуле

$$Q_{рез} = Q_3 - Q_{\phi 1} , \quad (14)$$

и соответственно

$$k_{ув.уч} = Q_3 / Q_{\phi 1} . \quad (15)$$

Таким же образом значение  $k_{ув.уч}$  определяют для других режимов работы вентилятора главного проветривания.

Максимально возможный коэффициент увеличения расхода воздуха для выемочного участка при параллельной работе вентиляторов главного проветривания  $k_{ув.уч}$ , м<sup>3</sup>/мин, определяют по формуле

$$k_{ув.уч} = Q_6 / Q_{\phi 2} . \quad (16)$$

Максимально возможный расход воздуха на выемочном участке при параллельной работе вентиляторов главного проветривания  $Q_{уч.мах}$ , м<sup>3</sup>/мин, определяют по формуле

$$Q_{уч.мах} = k_{ув.уч} Q_{уч.ф} , \quad (17)$$

где  $Q_{уч.ф}$  – фактический расход воздуха на участке, м<sup>3</sup>/мин.

При разных характеристиках или параметрах вентиляторов и работе их на «крутую» характеристику вентиляционной сети (см. рисунок, кривая 1) в результате их включения для совместной работы могут иметь место сбросы депрессии. Более мощный вентилятор (или вентилятор с небольшим отклонением параметров в большую сторону) будет забирать часть воздуха через менее мощный вентилятор, а в шахту будет поступать воздуха меньше, чем, когда он работал один. Так, например, на шахте «Горская» несколько попыток обеспечить совместную работу однотипных вентиляторов после аварии не увенчались успехом из-за очень «крутой» характеристики вентиляционной сети.

Резкое увеличение расхода воздуха при возвратно-точных схемах проветривания с выдачей исходящей струи воздуха на массив угля приводит к непрогнозируемым так называемым «всплескам» метана, что может привести к вспышкам и даже к взрыву. Так, например, на шахте «Волынская» длительное нахождение определяющего шлюза в открытом состоянии привело к снижению расхода воздуха в лаве, сокращению проветриваемой зоны в выработанном пространстве и накоплению метана в нем с высокой концентрацией. При закрывании шлюза расход воздуха в лаве резко увеличился, метановоздушная смесь была вытолкнута из выработанного пространства практически без ее разбавления. «Облако» с высокой объемной долей метана (до 26 %) вынесено из выработанного пространства на вентиляционный штрек, что привело к взрыву метановоздушной смеси.

С целью снижения размера всплесков концентрации метана рекомендовано применять плавное или ступенчатое регулирование расхода

воздуха за три-пять и более приемов с интервалом 10...30 мин, а также использовать турбулизаторы воздуха в зоне выноса метана.

Кроме того, может быть использовано отключение или частичное перекрытие действующей дегазации на других объектах, работающих на общую вакуум-насосную станцию. При этом расход отсасываемой метановоздушной смеси увеличивается от 20 до 50 %.

**Выводы.** На шахтах Донбасса имеются достаточные резервы воздуха и возможности их использования на выемочных участках при отключении систем дегазации.

Предложены эффективные способы увеличения подачи воздуха на выемочные участки за счет внутренних резервов, изменения сопротивления регуляторов воздуха, снижения подачи воздуха на второстепенные объекты, использования резервов на вентиляторах главного проветривания и усиления одного из видов дегазации (при комплексной дегазации).

Наиболее надежным и безопасным способом компенсации увеличения газовыделения при отключении систем дегазации является использование заранее созданных резервов воздуха.

Определены порядок и очередность выбора мероприятий по увеличению подачи воздуха на выемочный участок.

Акцентировано внимание работников шахт на возможности появления «всплесков» метана при резком увеличении подачи воздуха на выемочный участок и необходимости применения ступенчатого регулирования расхода воздуха на участке.

#### Список литературы / References

1. Пашковский, П.С. Проветривание выемочных участков при отключении систем дегазации / П.С. Пашковский, Н.В. Карнаух, А.В. Мавроди // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2017. – №1(54). – С. 85 – 93.

Pashkovskiy, P.S., Karnaukh, N.V., Mavrodi, A.V. *Provetrivaniye vuyemochnykh uchastkov pri otklyuchenii sistem degazatsii* [Ventilation of working areas by disconnection of degassing systems]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2017, no. 1(54), pp. 85 – 93.

2. Грядущий, В.Б. Предотвращение взрывов и вспышек метана в тупиках погашения вентиляционных выработок / В.Б. Грядущий, Е.Я. Самойленко // Уголь Украины. – 2006. – № 3. – С. 36 – 38.

Gryadushchiy, V.B., Samoylenko, Ye.Ya. *Predotvrashcheniye vzryvov i vspyshek metana v tupikakh pogasheniya ventilyatsionnykh vyrabotok* [Prevention of methane explosions and ignitions in blind drifts of depreciation of airways]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2006, no. 3, pp. 36 – 38.

3. Схемы и способы управления газовойделением на выемочных участках угольных шахт / Е.Л. Звягильский, Б.В. Бокий, О.И. Касимов, Н.В. Карнаух и др. – Макеевка: МакНИИ, 2006. – 78 с.

Zvyagil'skiy, Ye.L., Bokiyy, B.V., Kasimov, O.I., Karnaukh, N.V. etc. *Skhemy i sposoby upravleniya gazovydeleniyem na vyemochnykh uchastkakh ugol'nykh shacht* [Schemes and methods of gas control in working areas of coal mines]. Makeyevka, MakNII Publ., 2006, 78 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым.  
Дата поступления рукописи 02.04.2018

*Pyotr Semyonovich Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director on science; e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru);*

*Nikolay Viktorovich Karnaukh, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: [avrstla@mail.ru](mailto:avrstla@mail.ru);*

*Aleksandr Viktorovich Mavrodi, engineer; e-mail: [mavrodi-av@mail.ru](mailto:mavrodi-av@mail.ru)*

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

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

## NORMALIZATION OF GAS CONDITIONS OF A WORKING AREA BY DISCONNECTION OF A DEGASSING SYSTEM

**Purpose.** To evaluate the hazard and growth of methane release, to investigate methods of evaluation, possibility and methods of normalization of gas conditions of the working area by technological and emergency disconnections of the degassing system.

**Methods.** Analysis of the ventilation state of mines, working areas and degassing systems, methods of calculation of methane release during disconnection of the degassing systems, evaluation of the gas situation in the working area, that one of local methane accumulations, determination of air reserves in these areas, in a ventilation network and at main fans.

**Results.** The state of the ventilation of the mines, working areas and degassing systems has been analyzed, the possibility of formation of hazardous methane concentrations in the return air of the working areas and in local methane accumulations near packs, in blind drifts of depreciation of airways and in a waste has been shown, the methods of evaluation and calculation of a gas situation, necessary air consumption, those of calculation of its reserves and methods of their use to protect the carrying-out of the mining, recover and emergency-rescue operations by disconnection of the degassing system have been proposed.

**Scientific novelty.** The system approach to the calculations of the gas situation and normalization of the gas conditions during disconnection of the degassing system including calculation of methane release parameters, necessary air consumption and determination of the air reserves in the working areas, in the ventilation network and at the main fans as well as the order of the use and implementation of the existing reserves.

**Practical value.** The methods of calculation of the necessary air consumption for normalization of the gas conditions in the working area, methods of neutralization of the methane release growth and ensuring of the operation safety during disconnection of the degassing system have been worked out.

**Keywords:** *working area; disconnection of the degassing system; evaluation of the gas situation; methods of normalization of the gas conditions; methods of calculation of the necessary air consumption; air reserves and their determination.*

**УДК 622.822.22:622.411.33**

*Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: [obep.niigd@list.ru](mailto:obep.niigd@list.ru);*

*Александр Александрович Всякий, ст. науч. сотр.; e-mail: [sentyabr.eger@inbox.ru](mailto:sentyabr.eger@inbox.ru);*

*Ирина Геннадиевна Старикова, канд. техн. наук, ученый секретарь; e-mail: [ir-starik@yandex.ru](mailto:ir-starik@yandex.ru)*

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

## **ТЕПЛОВОЙ ЭФФЕКТ ДРОССЕЛИРОВАНИЯ МЕТАНА ИЗ ОТТОРГНУТОГО ОТ МАССИВА УГЛЯ**

**Цель.** Определение численных значений теплового эффекта дросселирования метана из углей разной степени метаморфизма.

**Методика.** Насыщение углей разной степени метаморфизма метаном до их природной газоносности, сброс давления и в специальной теплоизолированной установке измерение динамики скорости выделения метана и температуры для последующего расчета теплового эффекта дросселирования метана.

**Результаты.** Выполнено пять экспериментов с углями различных марок с долей горючих  $V^f$ , %, от 6 до 40, дробимости  $D_r$  от 6 до 30 при их насыщении метаном до 10...15 МПа и сбросе давления. С использованием имеющихся ранее данных получены зависимости для вычисления средней скорости выделения метана  $\mu_{ср}$ ,  $c^{-1}$ , от дробимости  $D_r$ , теплового эффекта дросселирования  $q_{др}$ , Дж/моль, от  $\mu_{ср}$ ,  $c^{-1}$ , теплового эффекта дросселирования от дробимости. Показано, что параметр дробимости однозначно определяет тепловой эффект дросселирования метана.

**Научная новизна.** Впервые получены данные о значениях теплового эффекта дросселирования из углей метана для значений  $V^f$ , %, от 6 до 32, дробимости  $D_r$  от 9 до 23,5 и найдено выражение для их вычисления.

**Практическое значение.** Полученные результаты позволяют рассчитать склонность углей к самовозгоранию.

**Ключевые слова:** газоносность угля; скорость истечения метана; дробимость; дросселирование; теплота.

**Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследований.** Длительность инкубационного периода самовозгорания угля (от 20 до 30 сут в Донбассе и более чем 40 сут в Кузнецком бассейне), а также мнение некоторых ученых [1], полагающих, что часть метана в угле находится в порах под давлением, позволяют сделать предположение, что окислительные процессы в угле в начальный период его отторжения от массива заторможены за счет напорного выделения метана и вызванного этим эффекта дросселирования, приводящего к охлаждению. Решение этого вопроса имеет практическое значение, так как позволит более точно рассчитывать инкубационный период самовозгорания угля.

Для проверки гипотезы авторами [2] выполнены теоретические и экспериментальные исследования с углями разных степеней метаморфизма и газоносности пласта. В качестве теоретической предпосылки теплообменных

процессов частиц сферической формы с окружающей средой принята обобщенная модель на случай наличия внутреннего источника теплоты [3].

Для проверки гипотезы авторами [2] выполнены теоретические и экспериментальные исследования с углями разных степеней метаморфизма и газоносности пласта. В качестве теоретической предпосылки теплообменных процессов частиц сферической формы с окружающей средой принята обобщенная модель на случай наличия внутреннего источника теплоты [3].

В худшем случае (с точки зрения отсутствия теплообмена скопления угля с окружающей средой) решение для динамики температуры угля получено в виде

$$\frac{T}{T_0} = \exp\left[\frac{J_m q_{др} t_n}{\rho c_v T_0}\right], \quad (1)$$

где  $J_m$  – интенсивность выделения метана из угля, моль/(м<sup>3</sup>·с); определяют зависимость

$$J_m = G_0 \mu_{ср} e^{-\mu_{ср} t_n}, \quad (2)$$

$G_0$  – газоносность угля, моль/м<sup>3</sup>;

$\mu_{ср}$  – средняя скорость выделения метана, с<sup>-1</sup>;

$t_n$  – время напорного выделения метана из угля, с;

$q_{др}$  – тепловой эффект дросселирования метана, Дж/моль;

$\rho$  – плотность угля, кг/м<sup>3</sup>;

$c_v$  – удельная теплоемкость угля при постоянном объеме, Дж/(кг·К);

$T_0$  – начальная температура угля, К.

Для экспериментального подтверждения гипотезы снижения температуры в период истечения из угля метана была разработана и изготовлена экспериментальная установка, определяющая тепловой эффект дросселирования метана из частиц угля. Чтобы соблюсти условия теплообмена угля с окружающей средой (вернее, его отсутствия согласно теоретическому решению) использовали сосуды Дьюара вместимостью порядка 1000 см<sup>3</sup>, смонтированные в пластиковых корпусах.

Провели три пробных эксперимента, используя угли, длительное время отделенные от массива (несколько суток) и потерявшие значительную часть метана, тем не менее подтвердившие снижение температуры и позволившие ориентировочно рассчитать тепловой эффект дросселирования метана.

Основываясь на положительных результатах опытов, проанализировали исследования динамики истечения метана из частиц углей после отделения от массива учеными МакНИИ, ИТТ АН Украины, Днепропетровского горного ин-та [4], Тульского политехнического ин-та, ВостНИИ, НИИГД «Респиратор» и др. Показано, что полученные авторами эмпирические зависимости носят гиперболический характер с коэффициентами, различными для каждого угля и не имеющими обобщенных данных. Существующие же теоретические

зависимости пригодны для небольших промежутков времени. Предложена усовершенствованная теоретическая зависимость динамики выделения метана и остаточной доли его в углях по мере их дегазации с учетом физических свойств углей, в том числе характера пор, уменьшающихся в диаметре по мере проникновения процесса дегазации в глубину угля.

Затем были выполнены исследования влияния петрографического состава углей на дросселирование из них метана [5]. Проанализированы данные отечественных и зарубежных исследователей зависимостей объемной доли углерода в углях  $C$ , %, от объемной доли летучих горючих  $V^r$ , %, пористости  $\Pi$ , %, от объемной доли углерода  $C$ , %, дробимости угля  $D_r$  от объемной доли углерода. Получены зависимости общей  $\Pi_{об}$ , %, и фильтрационной пористости  $\Pi_{ф}$ , %,  $V_{ф}$ , см<sup>3</sup>/т, от  $V^r$  и дробимости. Даны зависимости для вычисления по экспериментальным данным динамики температур охлаждения угля при истечении из него метана, средней температуры за время напорного истечения, динамики расхода истечения  $\mu$ , мл/с, теплового эффекта дросселирования метана  $q_{др}$ , Дж/моль.

Показано, что параметр дробимости углей однозначно характеризует текстуру пористого пространства и адекватно отражает фильтрационную пористость независимо от характеристик пористой структуры.

**Цель настоящей работы** – систематизация и анализ новых данных, полученных с различным типом углей при насыщении их метаном до природной газоносности (до 10...15 МПа), сбросе давления и отыскании параметров газоотдачи и теплового эффекта дросселирования метана.

**Результаты исследований.** Эксперименты выполняли с углями различных марок, в которых горючих  $V^r$  от 6 до 40 %, с дробимостью  $D_r$  от 6 до 30. Средняя скорость выделения метана  $\mu_{ср}$ , с<sup>-1</sup>, в различных углях – от  $1 \cdot 10^{-6}$  до  $30 \cdot 10^{-6}$  с<sup>-1</sup>. Характеристика углей, экспериментальные данные измерения температуры напорного выделения метана и расчетные значения теплового эффекта дросселирования метана приведены в таблице.

#### Характеристика углей и основные параметры истечения из них метана

Шахта, индекс пласта	$V^r$ , %	$G_0$ , моль/м <sup>3</sup>	$D_r$	$T_0$ , К	$\Delta T_{ср}$ , К	$\mu_{ср} \cdot 10^{-6}$ , с <sup>-1</sup>	$t_n$ , ч	$q_{др}$ , Дж/моль
«22 Коммунарская», $k_5$	6	1620	9	298,2	1,66	4	77	11900
«Никонор-Новая», $k_5^1$	4	1296	13	295,2	2,02	4,2	72	16666
Им. А.Ф. Засядько, $m_3$	36	1944	20,5	295	...	7	72	...
«Северная», $l_3$	20	648	25	295	...	12	72	...
«Бутовка-Донецкая», $n_1$	38	405	30	295	...	17,5	36,5	...
«Чайкино», $m_3$	30	486	30	295	...	20	50	...
«Южнодонбасская», $c_{13}$	12	1026	38	295	...	27	51	...
«Щегловская-Глубокая», $l_1^B$	25	1350	23,5	294,1	2,05	20	14	39990
«Торецкая», $l_2$	32	540	15,7	295	0,26	3,5	57,5	10200
«Белореченская», $l_6$	40	469,8	12	298,3	0,86	5,9	73,3	12337

Полученные экспериментально в девяти опытах по истечению метана из углей скорости истечения  $\mu$ ,  $\text{с}^{-1}$ , имели гиперболический характер. Найденные для них среднеинтегральные значения  $\mu = \mu_{\text{ср}}$  за время напорного выделения метана  $t_{\text{н}}$ , с, представлены в виде функции от дробимости угля на рис. 1 различными маркерами, соответствующими названиям шахт в таблице.

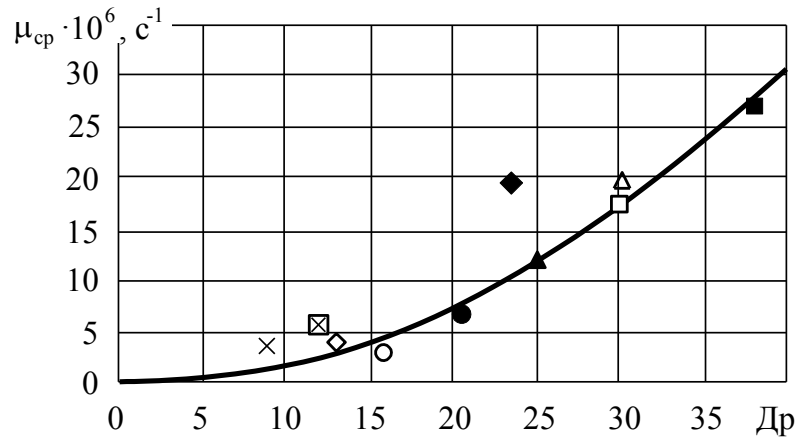


Рис. 1. Зависимость средней скорости истечения метана из различных углей от дробимости:

× – «Коммунарская»; ◇ – «Никанор-Новая»; ● – им. А.Ф. Засядько;  
 ▲ – «Северная»; □ – «Бутовка-Донецкая»; △ – «Чайкино»; ■ – «Южно-Донбасская»;  
 ◆ – «Щегловская-Глубокая»; ○ – «Торецкая»; ⊠ – «Белореченская»

Аппроксимирующая эти данные зависимость имеет вид

$$\mu_{\text{ср}} = 0,4 \cdot 10^{-6} + 2 \cdot 10^{-8} (\text{Др} - 1)^2. \quad (3)$$

Далее для пяти видов углей была измерена в ходе эксперимента температура в реакционном и сравнительном сосудах, найдено ее среднеинтегральное значение. Затем по формуле (2) вычислена средняя интенсивность выделения метана  $J_{\text{м ср}}$ , моль/ $(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ , за время напорного его выделения  $t_{\text{н}}$ . Из формулы (1) найдена зависимость для нахождения теплоты дросселирования из углей метана в виде

$$q_{\text{др}} = \rho c_v T_0 \ln \frac{T_0 - \Delta T_{\text{ср}}}{T_0} / (J_{\text{м}} t_{\text{н}}), \quad (4)$$

и по ней вычислены значения  $q_{\text{др}}$ , Дж/ моль, для пяти шахт.

Имея зависимость (3)  $\mu_{\text{ср}}$  от Др, по формуле (4) вычислим  $q_{\text{др}}$  для значений  $\mu_{\text{ср}}$  до  $40 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$  и построим график (рис. 2) с нанесенными пятью экспериментальными данными по шахтам, на которых была измерена температура.

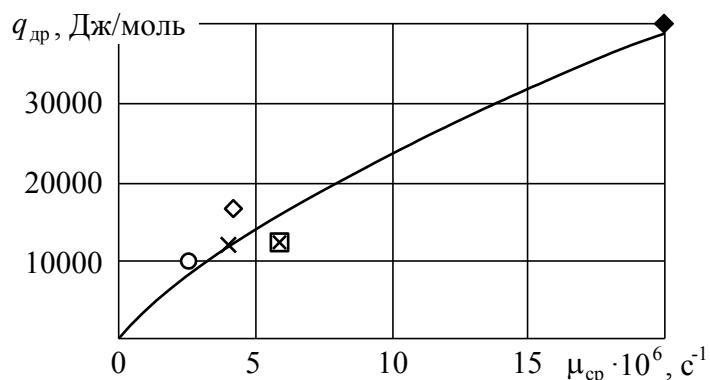


Рис. 2. Зависимость теплового эффекта дросселирования метана от скорости его выделения:

○ – «Торецкая»; × – «Коммунарская»; ◇ – «Никанор-Новая»;  
◆ – «Щегловская-Глубокая»; ⊠ – «Белореченская»

График этой зависимости может быть описан выражением

$$q_{др} = 7,7 \cdot 10^7 (\mu_{ср} - 0,4 \cdot 10^{-6})^{0,7}. \quad (5)$$

В работе [5] показано, что текстура пористого пространства адекватно отображает фильтрационную пористость независимо от характеристик пористой структуры и может быть охарактеризована дробимостью.

Поэтому, подставляя уравнение (3) в (5), построим график зависимости  $q_{др}$  от  $Др$  (рис. 3).

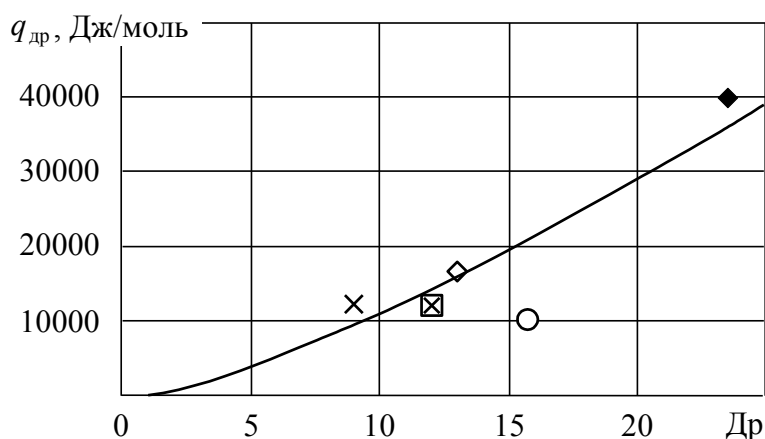


Рис. 3. Зависимость теплового эффекта дросселирования метана из углей от их дробимости:

○ – «Торецкая»; × – «Коммунарская»; ◇ – «Никанор-Новая»;  
◆ – «Щегловская-Глубокая»; ⊠ – «Белореченская»

Представленная на рис. 3 кривая может быть описана зависимостью

$$q_{др} = 630(Dp - 1)^{1,3}. \quad (6)$$

На этой кривой нанесены данные вычисленных тепловых эффектов дросселирования метана из углей по пяти шахтам Донбасса, которые удовлетворительно на нее укладываются.

### Выводы

1. Выполнены и проанализированы эксперименты по сбросу давления метана (с 10...15 до 0,1 МПа) и изучению динамики его истечения из углей разной степени метаморфизма в теплоизолированных условиях.

2. Получены экспериментальные данные о динамике температур по мере истечения метана, вызванных эффектом дросселирования его из углей.

3. Найдена зависимость скорости истечения из углей метана как функция из дробимости.

4. По полученным данным рассчитан тепловой эффект дросселирования из углей метана и найдена его зависимость от дробимости углей.

Полученные результаты позволяют рассчитать инкубационный период самовозгорания углей.

### Список литературы / References

1. Алексеев, А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – Киев: Наукова думка, 2010. – 423 с.

Alekseyev, A.D. *Fizika uglya i gornykh protsessov* [Physics of coal and mining processes]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2010, 423 p.

2. Греков, С.П. Охлаждение угля за счет дросселирования выделяющегося метана / С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 97 – 107.

Grekov, S.P. Orlikova, V.P., Vsyakiy, A.A. *Okhlazhdeniye uglya za schyet drosselirovaniya vydelyayushchegosya metana* [Coal cooling at the expense of throttling of the emitting methane]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2013, issue 50, pp. 97 – 107.

3. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: Арпи, 2012. – 656 с.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Aktual'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya* [Actual problems of control of the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.

4. Коптиков, В.П. Охлаждение угля при истечении метана / В.П. Коптиков, С.П. Греков, А.А. Всякий // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2018. – Вып. 4 (55). – С. – 108 – 118.

Koptikov, V.P., Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A. *Okhlazhdeniye uglya pri istechenii metana* [Coal cooling by methane release]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2018, no. 4(55), pp. 108 – 118.

5. Греков, С.П. Влияние петрографического состава углей на дросселирование из них метана / С.П. Греков, А.А. Всякий, И.Г. Старикова / Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – 2019. – Вып. 1(56) – С. 57 – 67.

Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A., Starikova, I.G. *Vliyaniye petrograficheskogo sostava ugley na drosselirovaniye iz nikh metana* [Influence of the petrographic composition of coals on methane throttling from them]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 57 – 67.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Г.П. Стариковым.  
Дата поступления рукописи 28.01.2019

*Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: [obep.niigd@list.ru](mailto:obep.niigd@list.ru);*

*Aleksandr Aleksandrovich Vsyakiy, senior scientific associate; e-mail: [sentyabr.eger@inbox.ru](mailto:sentyabr.eger@inbox.ru);*

*Irina Gennadiyevna Starikova, Cand. Sci. (Tech.), academic secretary; e-mail: [ir-starik@yandex.ru](mailto:ir-starik@yandex.ru)*

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

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

## THERMAL EFFECT OF THE METHANE THROTTLING FROM COAL SEPARATED FROM THE MASSIF

**Purpose.** Determination of numerical values of the thermal effect of methane throttling from coals of the various metamorphism degree.

**Methods.** Saturation of coals of the various metamorphism degree with methane up to their natural gas content, depressurization and measurement of dynamics of the methane emission velocity and temperature in a special heat insulating installation for the subsequent calculation of the thermal effect of methane throttling.

**Results.** Five experiments with coals of various ranks have been fulfilled. The fraction of combustibles  $V^f$ , %, was from 6 up to 40, the breakability  $D_p$  was from 6 up to 30 by their saturation with methane up to 10...15 MPa and depressurization. With the use of the data existing earlier the dependences for calculation of the average methane emission velocity  $\mu_{cp}$ ,  $s^{-1}$ , on breakability  $D_p$ , of the thermal throttling effect  $q_{др}$ , J/mol, on  $\mu_{cp}$ ,  $s^{-1}$ , of the thermal throttling effect on breakability have been obtained. It is shown that the parameter of breakability determines unambiguously the thermal methane throttling effect.

**Scientific novelty.** The data about the values of the thermal methane throttling effect from coals have been obtained for the values of  $V^f$ , %, from 6 up to 32, of breakability  $D_p$  from 9 up to 23.5 for the first time, and the expression has been found for their calculation.

**Practical value.** The obtained results allow calculating the liability of coals to spontaneous combustion.

**Keywords:** *gas content of coal; methane release rate; breakability; throttling; heat.*

**УДК [622.016.2:622.411.33]:001.891.572**

**Юрий Фёдорович Булгаков**, д-р техн. наук, завкафедрой; e-mail: [byf@mine.donntu.org](mailto:byf@mine.donntu.org)

Государственное учреждение высшего и профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-09;

**Игорь Феликсович Дикенштейн**, науч. сотр.; e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@mail.ru)

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

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

**Заверюха Виктория Владимировна**, ассистент; e-mail: [viksuta@gmail.com](mailto:viksuta@gmail.com)

Государственное учреждение высшего и профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-09

**МЕТАНОВЫДЕЛЕНИЕ В ЗАБОЕ ТУПИКОВОЙ ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ**

**Цель.** Разработка математической модели загазования тупиковых выработок.

**Методика** основана на применении классических уравнений нестационарной конвективной диффузии газа.

**Результаты.** Рассмотрена модель загазования призабойного пространства тупиковых выработок при пожаре, учитывающая влияние температуры в выработке на коэффициент диффузии газа.

**Научная новизна.** Усовершенствована математическая модель, получена простая зависимость времени загазования от размеров тупиковой выработки, интенсивности метановыделения из забоя и дальности продвижения очага пожара.

**Практическая значимость.** Полученные результаты можно использовать в оперативной обстановке для оценки взрывоопасности в аварийной выработке.

**Ключевые слова:** метан; взрывоопасность; тупиковая выработка; концентрация; коэффициент диффузии.

**Постановка проблемы.** Вспышки и взрывы метана и угольной пыли – один из самых опасных видов подземных аварий. На угольных шахтах ДНР и Российской Федерации ежегодно происходят десятки вспышек и взрывов метана. Наибольший резонанс вызывают взрывы метана и угольной пыли. Они, как правило, приводят к катастрофическим последствиям для горнорабочих и серьезным разрушениям на предприятиях.

С 2012 по 2017 г. на шахтах ДНР произошло 13 вспышек и взрывов метана.

Так, 04.03.2015 в шахте им. А.Ф. Засядько произошел взрыв метановоздушной смеси в выемочном участке восточной уклонной лавы пл.  $m_3$  вследствие фрикционного искрения при трении зубков шнеков комбайна о твердые включения пирита и песчаника. Пострадало 68 человек, в том числе 33 со смертельным исходом.

На шахтах России за тот же период произошло 28 взрывов и возгораний метановоздушной смеси, в том числе 19 – в забоях тупиковых выработок [1].

Метан, как и прежде, продолжает оставаться одним из самых опасных факторов горных работ, особенно при проведении выработок в очистной выемке угля, создавая дополнительные трудности и экономические проблемы при разработке местных угольных месторождений.

Основные причины нарушения проветривания тупиковых выработок: остановка вентиляторов местного проветривания, обрыв, пережатие, рассоединение вентиляционных труб, их недопустимое отставание от забоя. Вследствие нарушения проветривания тупиковых выработок, недостаточной турбулентности воздушной струи часто образуются местные и слоевые скопления метана у забоев, происходит загазование куполов, «кутков», тупиков и других слабо обдуваемых участков выработок (забоев). Нередко из-за недостаточного проветривания (скорости струи воздуха), отсутствия дегазации и орошения рабочего органа комбайна возникают скопления метана высокой концентрации в местах воздействия рабочего органа проходческих и добычных комбайнов на угольный массив, происходит искрение, которое в некоторых случаях приводит к взрыву метана.

В связи с повышением интенсивности горно-проходческих и очистных работ увеличивается количество выделяющегося метана из горного массива и отбитой горной массы. В отдельных, проводимых по углю выработках его объем достигает 1000...3000 м<sup>3</sup> на 1 т суточной добычи (на отдельных шахтах 1000...1500 м<sup>3</sup>). Этот фактор приводит к тому, что некоторые очистные и подготовительные забои работают на пределе возможности по проветриванию (объемная доля метана в исходящей струе достигает 1...1,3 %), что не позволяет увеличить суточный объем добычи и проходки [2].

Еще одной из причин является недостаточная изученность закономерностей выделения газов в горные выработки. Источниками газовыделения в шахтах, как правило, являются вмещающие пласт породы, угольные пласты, буровзрывные работы. Газоносные породы представляют собой распределенные источники с существенно изменяющейся во времени интенсивностью выделения метана. Кроме того, интенсивность выделений и диффузионных процессов распределения метана по выработке зависит от внешних условий, в первую очередь от температуры окружающей среды.

Поэтому адекватное математическое описание этих процессов и установление корректных закономерностей метановыделения в выработки имеют весьма значительное научное и практическое значение с точки зрения повышения безопасности ведения горных работ.

**Анализ последних публикаций.** Многочисленные случаи взрывов метановоздушных смесей в угольных шахтах свидетельствуют о необходимости рассмотрения взаимосвязанных вопросов газовыделения и образования в шахтах зон со взрывными концентрациями метана. Такая задача была рассмотрена в совместной работе НИИГД и МакНИИ в 2006 г. [3]. При выполнении исследований полагали, что тупиковая выработка не

проветривается и практически мгновенно заполняется выброшенным из угля метаном.

Процессы газовыделения из отбитого от массива угля и формирования взрывоопасных зон в тупиковых выработках изучены в работе [4].

В работе [5] проанализированы переходные газодинамические процессы, возникающие на добычных участках угольных шахт при изменении режимов дегазации и вентиляции. Особенности выделения метана из газоносного массива под влиянием очистных и других горных работ рассмотрены в статьях [6, 7].

Авторы обзорного исследования [1] рассмотрели причины и возможные способы предотвращения пожаров и взрывов метана на шахтах России, в том числе и в тупиковых выработках. В монографии В.Г. Агеева [8] рассмотрен случай формирования взрывоопасной среды в тупиковой выработке при внезапном выбросе породы, угля и газа.

Однако полученные в этих работах аналитические и эмпирические зависимости очень упрощены или наоборот слишком усложнены и не дают возможности рассчитать необходимые параметры в оперативной обстановке. Например, открытым остается вопрос о времени загазования тупиковой выработки.

**Цель работы** – определение времени загазования тупиковой выработки метаном до взрывоопасных концентраций при нарушении ее проветривания.

**Материалы и результаты исследований.** Как показывает статистика, пожары в тупиковых выработках возникают в 70...80 % случаев в призабойном пространстве. Для оценки складывающейся обстановки необходимо построить математическую модель, описывающую закономерность формирования взрывоопасной среды в забое тупиковой выработки. С этой целью используем уравнение нестационарной конвективной диффузии газа в общем виде:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial(vC)}{\partial x} + \frac{\partial(uC)}{\partial y} + \frac{\partial(wC)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right), \quad (1)$$

где  $C$  – объемная доля метана, %;

$t$  – время с момента нарушения вентиляции, с;

$v, u, w$  – проекции скорости воздуха на оси координат, м/с;

$x, y, z$  – продольная, вертикальная и поперечная координаты, м;

$D_x, D_y, D_z$  – коэффициенты турбулентной диффузии газа в направлении соответствующих координат.

Рассматриваем одномерный случай.

В этом случае уравнение нестационарной конвективной диффузии метана имеет вид

$$\frac{dc}{dt} + \frac{dc}{dx} - \frac{d}{dx} \left( D \frac{dc}{dx} \right) = 0, \quad (2)$$

где  $v = Q_m^{(0)} / S$  – скорость потока, м/с;

$D$  – коэффициент диффузии метана, м<sup>2</sup>/с;  
 $Q_m^{(0)}$  – метановыделение из забоя, м<sup>3</sup>/с;  
 $S$  – площадь сечения выработки, м<sup>2</sup>.

Рассмотрим вопрос определения времени загазования призабойного пространства тупиковой выработки (рис. 1). Предполагаем, что пожар ушел на расстояние  $L_x$  от забоя. Будем считать, что на интервале  $0 < x < L_x$  горючая нагрузка выгорела и поступление газового потока идет только от забоя. Вентиляция нарушена.

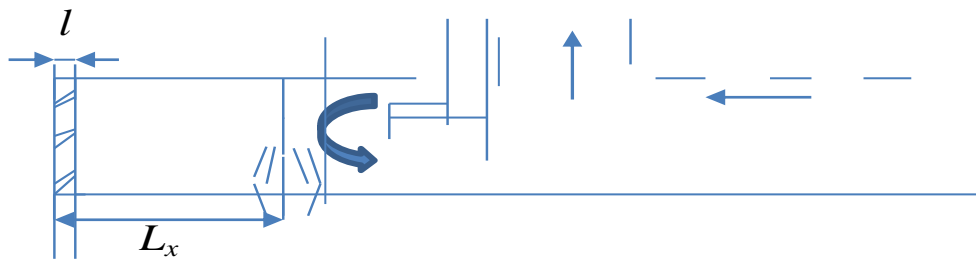


Рис. 1. Схема аварийной тупиковой выработки

Решение уравнения (2) при начальном и граничном условиях

$$\left. \begin{aligned} C(x, 0) &= C_0; \\ C(0, t) &= C_0 \gamma(t) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

имеет вид

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{\frac{v_x}{2D}} \left[ \int_{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} \gamma \left( t - \frac{x^2}{4Du^2} \right) e^{-u^2 - \frac{v^2 x^2}{16D^2 u^2}} du - \int_{\frac{x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} e^{-u^2 - \frac{v^2 x^2}{16D^2 u^2}} du \right] \right\}. \quad (4)$$

Выделим узкую полосу толщиной  $l$ , прилегающую к забоя.

В ней скорость изменения концентрации метана подчиняется уравнению

$$\frac{dc(0, t)}{dt} = \frac{1 - c(0, t)}{\tau}, \quad (5)$$

где  $\tau = l/v$ .

Отсюда имеем

$$\gamma(t) = \frac{1}{C_0} \left[ 1 - (1 - C_0) e^{-\frac{t}{\tau}} \right]. \quad (6)$$

Подставляем функцию (6) в уравнение (4) и получаем

$$C(L_x, t) = C_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{\frac{vL_x}{2D}} (1 - C_0) \times \left[ \int_{\frac{L_x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} e^{-u^2 - \frac{v^2 L_x^2}{16D^2 u^2}} du - e^{-\frac{t}{\tau}} \int_{\frac{L_x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} e^{-u^2 - \frac{v^2 L_x^2}{16D^2 u^2} \left(1 - \frac{4D}{v^2 \tau}\right)} du \right]. \quad (7)$$

Полагаем  $l = 4D/v$ ;  $\tau = 4D/v^2$ .

Окончательно получаем

$$C(L_x, t) = C_0 + \frac{2}{\sqrt{\pi}} e^{\frac{vL_x}{2D}} (1 - C_0) \left[ \int_{\frac{L_x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} e^{-u^2 - \frac{v^2 L_x^2}{16D^2 u^2}} du - e^{-\frac{v^2 t}{4D}} \int_{\frac{L_x}{2\sqrt{Dt}}}^{\infty} e^{-u^2} du \right]. \quad (8)$$

Интегральные члены существенно влияют на величину  $C(L_x, t)$  при условии, что

$$\chi = \frac{4D}{vL_x} \ll 1. \quad (9)$$

Если измерять время в единицах

$$t = \frac{1}{1 + \sqrt{\chi y}} \frac{L_x}{v}, \quad (10)$$

где  $y$  – безразмерная величина, то приближенное решение (8) имеет вид

$$C(L_x, y) = C_0 + \left[ \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} (1 - C_0) \right] e^{-y}. \quad (11)$$

Критическое значение концентрации метана  $C(L_x, y) = C_{\text{крит}}$  достигается при значениях  $y$

$$y = \ln \left[ \frac{1 - C_0}{C_{\text{крит}} - C_0} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} \right]. \quad (12)$$

Данные расчетов по времени загазования выработки до критического значения  $C_{\text{крит}} = 0,04$  приведены в табл. 1.

При этом коэффициент диффузии метана рассчитываем по зависимости

$$D = \sqrt{\frac{\pi k T_0}{M}} \frac{\sqrt{\theta}}{4\pi G_0 n_0}, \quad (13)$$

где  $M$  – молярная масса метана, кг/моль;  
 $k$  – постоянная Больцмана, Дж·К<sup>-1</sup>;  
 $G_0$  – эффективное сечение столкновения молекул, м<sup>2</sup>;  
 $n_0$  – число Лошмидта, м<sup>-3</sup>;  
 $\theta = T/T_0$ ;  
 $T$  – температура газа, К;  
 $T_0 = 300$  К.

Таблица 1

Время загазования  $t_{\text{мин}}$  в зависимости от начальной доли метана  $C_0$ , температуры в выработке и дальности продвижения очага пожара

$C_0$	$T, ^\circ\text{C}$	$L^*, \text{м}$	$t, \text{мин}$
0	500	10	15,92
0	500	15	24,07
0	500	20	32,26
0	500	25	40,46
0	500	30	48,67
0	500	35	56,9
0	500	40	65,13
0	700	10	15,85
0	700	15	23,99
0	700	20	32,17
0	700	25	40,36
0	700	30	48,56
0	700	35	56,78
0	700	40	65
0,01	500	10	15,88
0,01	500	15	24,02
0,01	500	20	32,2
0,01	500	25	40,4
0,01	500	30	48,6
0,01	500	35	56,82
0,01	500	40	65,05
0,01	700	10	15,81
0	700	15	23,94
0	700	20	32,1
0	700	25	40,29
0	700	30	48,48
0	700	35	56,69
0	700	40	64,91

Окончание табл. 1

$C_0$	$T, ^\circ\text{C}$	$L^*, \text{м}$	$t, \text{мин}$
0,02	500	10	15,82
0,02	500	15	23,96
0,02	500	20	32,12
0,02	500	25	40,31
0,02	500	30	48,51
0,02	500	35	56,72
0,02	500	40	64,94
0,02	700	10	15,75
0,02	700	15	23,87
0,02	700	20	32,02
0,02	700	25	40,19
0,02	700	30	48,38
0,02	700	35	56,58
0,02	700	40	64,79

Принимаем по нормам [8]  $Q_M^0 = 0,05 \text{ м}^3/\text{с}$ ; площадь сечения выработки  $S = 5 \text{ м}^2$ ; тогда  $v = 0,01 \text{ м/с}$ .

Результаты расчетов времени загазования призабойного пространства тупиковой горной выработки с площадью сечения  $S = 5 \text{ м}^2$  в зависимости от интенсивности метановыделения представлены в табл. 1, 2 и на рис. 2.

Таблица 2

Расчет времени загазования в зависимости от температуры в выработке

$L_x, \text{м}$	Температура в выработке, $^\circ\text{C}$				
	500	600	700	800	900
	Время загазования $t_{\text{заг}}, \text{мин}$				
10	15,9	15,8	15,8	15,8	15,8
15	24,1	24,0	23,9	23,9	23,9
20	32,3	32,2	32,1	32,0	32,0
25	40,5	40,4	40,3	40,3	40,2
30	48,7	48,6	48,5	48,5	48,4
35	56,8	56,8	56,7	56,7	56,6
40	65,1	65,3	64,9	64,9	64,8

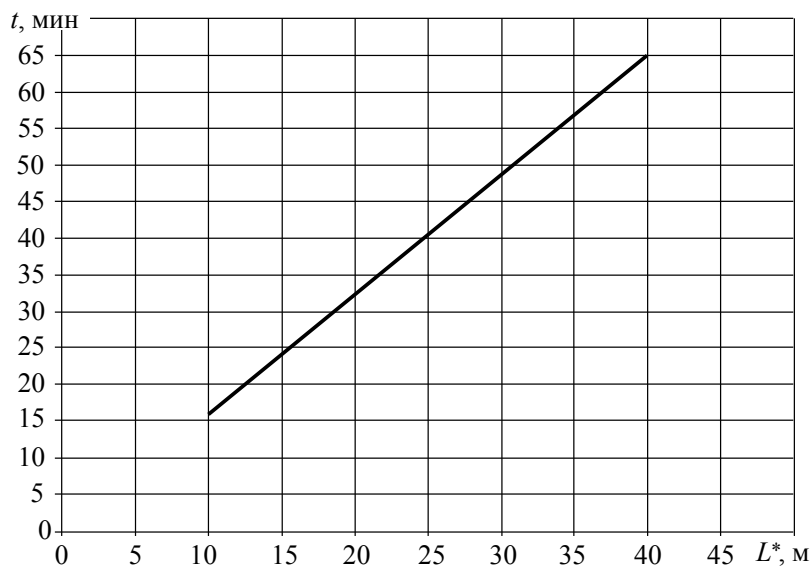


Рис. 2. Зависимость времени загазования призабойного пространства тупиковой выработки от дальности продвижения пожара

Из табл. 2 видно, что время загазования при учете влияния температуры только на коэффициент диффузии газа практически не изменяется.

**Выводы.** Получена зависимость, позволяющая в оперативной аварийной обстановке определить время загазования в тупиковой выработке до взрывоопасной концентрации. Для более адекватного описания газодинамических процессов необходимо учесть влияние температуры в выработке на интенсивность метановыделения с поверхности забоя.

#### Список литературы / References

1. Колесниченко, Е.А. Анализ причин и возможные методы предотвращения взрывов метана и пожаров в шахтах России / Е.А. Колесниченко, И.Е. Колесниченко // Горный информационно-аналитический бюллетень: науч.-техн. журн. – 2004. – № 8. – С. 130 – 137.

Kolesnichenko, Ye.A., Kolesnichenko, I.Ye. *Analiz prichin i vozmozhnyye metody predotvrashcheniya vzryvov metana i pozharov v shakhtakh Rossii* [Analysis of causes and possible methods of prevention of methane explosions and fires in mines of Russia]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten': nauch.-tekhn. zhurn.* – Mining information-analytical newsletter: scientific-technical journal, 2015, no. 8, pp. 130 – 137.

2. Минеев, С.П. О предупреждении аварий, связанных со взрывами метана в угольных шахтах / С.П. Минеев; Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины [Электронный ресурс]. – URL: <http://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/150743/1/286-297.pdf> (дата обращения: 27.01.2019).

Mineyev, S.P. *O preduprezhdenii avariy, svyazannykh so vzryvami metana v ugol'nykh shakhtakh* [On prevention of accidents associated with methane explosions in coal mines]. *Institut geotekhnicheskoy mekhaniki im. N.S. Polyakova NAN Ukrainy* [N.S. Polyakov Institute of geotechnical mechanics of the National Academy of Sciences of the Ukraine] [Electronic resource]. Available at: <http://ir.nmu.org.ua/jspui/bitstream/123456789/150743/1/286-297.pdf> (accessed 27.01.2019).

3. Брюханов, А.М. Закономерности формирования взрывоопасной среды при внезапных выбросах породы, угля и газа в тупиковых выработках угольных шахт / А.М. Брюханов // Пожежна безпека: зб. наук. пр. / ЛДУ БЖД. – Львів, 2007. – № 10. – С. 121 – 125.

Bryukhanov, A.M. *Zakonomernosti formirovaniya vzryvoopasnoy sredy pri vnezapnykh vybrosakh porody, uglya i gaza v tupikovykh vyrabotkakh ugol'nykh shakht* [Mechanism of formation of an explosive environment by sudden rock, coal and gas outbursts in blind drifts of coal mines]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. prats'* [Fire safety: collected scientific papers]. LDU BZhd, Lviv, 2007, no. 10, pp. 121 – 125.

4. Греков, С.П. Моделирование переходных газодинамических процессов при изменениях режимов дегазации вентиляции / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, А.Л. Иванников // Вісник Харківського ун-ту. – 2011. – № 960. – С. 95 – 103.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Ivannikov, A.L. *Modelirovaniye perekhodnykh gazodinamicheskikh protsessov pri izmeneniyakh rezhimov degazatsii ventilyatsii* [Modeling of transient gas-dynamic processes by changes of degassing ventilation conditions]. *Visnyk Kharkivs'kogo un-tu* [Bulletin of the Kharkiv university], 2011, no. 960, pp. 95 – 103.

5. Агеев, В.Г. Газовыделение из отторгнутого от массива угля и формирование взрывоопасных зон при внезапных выбросах угля и газа в тупиковых горных выработках / В.Г. Агеев, С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Физико-технические проблемы горного производства. – 2013. – Вып. 6. – С. 137 – 154.

Ageyev, V.G., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Gasovydeleniye iz ottorgnutogo massiva uglya i formirovaniye vzryvoopasnykh zon pri vnezapnykh vybrosakh uglya i gaza v tupikovykh gornykh vyrabotkakh* [Gas release from coal separated from the massif and formation of explosion hazard zones by sudden coal and gas outbursts in blind drifts of mines]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva* [Physicotechnical problems of mining practice], 2013, issue 6, pp. 137 – 154.

6. Костенко, В.К. Особенности выделения метана из газоносного массива под влиянием горных работ / В.К. Костенко, А.Б. Бокий // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2010. – Вып. 88. – С. 264 – 270.

Kostenko, V.K., Bokiyy, A.B. *Osobennosti vydeleniya metana iz gazonosnogo massiva pod vliyaniyem gornykh robot* [Peculiarities of methane release from a gas-bearing massif under the influence of mining operations]. *Geotekhnicheskaya mekhanika: mezhved. sb. nauch. tr.* [Geotechnical mechanics: interdepartmental

collected scientific papers]. Dnepropetrovsk, IGTM NANU, 2010, issue 88, pp. 264 – 270.

7. Костенко, В.К. Влияние очистных работ на процесс выделения метана из породного массива / В.К. Костенко, А.Б. Бокий, Е.В. Шевченко // Известия Донецкого горного института. – Донецк: ДонНТУ, 2007. – № 2. – С. 36 – 43.

Kostenko, V.K., Bokiyy, A.B., Shevchenko, Ye.V. *Vliyaniye ochistnykh rabot na protsess vydeleniya metana iz porodnogo massiva* [Influence of winning operations on the process of methane release from a rock massif]. *Izvestiya Donetskogo gornogo instituta* [Proceedings of the Donetsk Institute of Mines]. Donetsk, DonNTU, 2007, no. 2, pp. 36 – 43.

8. Агеев, В.Г. Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах / В.Г. Агеев. – Донецк: Арпи, 2014. – 338 с.

Ageyev, V.G. *Vzryvozashchita pri izolyatsii pozharov v ugol'nykh shachtakh* [Explosion protection by isolation of fires in coal mines]. Donetsk, Arpi Publ., 2014, 338 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Сынковым.  
Дата поступления рукописи 07.02.2019

**Yury Fyodorovich Bulgakov**, Dr. Sci. (Tech.), head of subdepartment; e-mail: [byf@mine.donntu.org](mailto:byf@mine.donntu.org)

The State Educational Institution of Higher Occupational Education

“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-09;

**Igor Feliksovich Dikenshteyn**, scientific associate; e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@mail.ru)

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-Rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

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

**Viktoria Vladimirovna Zaveryukha**, assistant lecturer; e-mail: [viksuta@gmail.com](mailto:viksuta@gmail.com)

The State Educational Institution of Higher Occupational Education

“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-09

## METHANE RELEASE IN A COAL-FACE OF A BLIND DRIFT OF A MINE

**Purpose.** Working-out the mathematical model of gas contamination of the blind drifts.

The **methods** are based on the application of classic equations of the non-stationary convective gas diffusion.

**Results.** The model of gas contamination of a face area of the blind drifts by the fire has been considered taking into account the influence of the temperature in a mine working on the gas diffusion coefficient.

**Scientific novelty.** The mathematical model has been improved, the simple dependence of the time of gas contamination on blind drift dimensions, intensity of the methane release from the coal-face and distance of propagation of the seat of fire has been obtained.

**Practical value.** The obtained results may be used in the operative situation for assessment of the explosion hazard in the accidental mine working.

**Keywords:** methane; explosion hazard; blind drift; concentration; diffusion coefficient.

**УДК 614.894.7:620.165.29.05**

*Любовь Алексеевна Зборщик, врио нач. отд.; e-mail: [oszd\\_niigd\\_1@mail.ru](mailto:oszd_niigd_1@mail.ru);*

*Руслан Сергеевич Плетенецкий, науч. сотр.; e-mail: [zoloto-russland@yandex.ru](mailto:zoloto-russland@yandex.ru);*

*Александр Витальевич Чапкович, гл. инж.; e-mail: [emajsept@mail.ru](mailto:emajsept@mail.ru);*

*Виктор Иванович Францев, вед. инж.; e-mail: [oszd\\_niigd\\_3@mail.ru](mailto:oszd_niigd_3@mail.ru)*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 332-78-45*

## **УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОНТРОЛЬНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ПРОВЕРКИ РЕСПИРАТОРОВ**

**Цель.** Исследование возможности разработки универсального контрольного прибора для проверки респираторов в соответствии с современными требованиями.

**Методика.** Теоретические исследования.

**Результаты.** Создана блок-схема универсального контрольного прибора для проверки респираторов, предполагающая использование современных электронных компонентов в цепях измерения, преобразование, индикацию и накопление массива данных рабочих параметров респиратора Р-30, находящегося на оснащении подразделений ГВГСС МЧС ДНР.

**Научная новизна.** Разработана блок-схема универсального контрольного прибора для проверки респираторов с использованием современных электронных датчиков и преобразователей измеряемых физических величин в электрические, предусматривающая накопление и анализ полученных данных.

**Практическая значимость.** Полученные результаты исследований позволят разработать универсальный контрольный прибор для проверки респираторов Р-30 в соответствии с современными требованиями, используя современные электронные компоненты, позволяющие измерять, преобразовывать, индицировать и накапливать массив параметров, необходимых для последующего регулирования.

**Ключевые слова:** *контрольный прибор; респиратор; датчик давления; датчик разрежения; расходомер.*

**Постановка проблемы.** Подразделения ГВГСС МЧС ДНР оснащены респираторами со сжатым кислородом Р-30. Для безопасной эксплуатации с определённой периодичностью респираторы проверяют и регулируют (в случае необходимости). Однако для проверки респираторов в течение более 30 лет используют морально устаревшие контрольные приборы УКП-5, практика эксплуатации которых выявила ряд неудобств в их использовании: возможность пролива спирта из манометра-реометра, частая поломка запорных и регулировочных кранов.

Поэтому актуальна разработка новых контрольных приборов с улучшенными потребительскими характеристиками, с применением электронных датчиков, возможностью накопления, хранения и статистической обработки основных параметров респираторов Р-30.

**Анализ последних исследований.** Состоящий на оснащении подразделений ГВГСС МЧС ДНР прибор УКП-5 состоит из жидкостного манометра-реометра и расходомера, предназначенных для определения параметров проверяемого респиратора, и системы для создания потока воздуха энергией сжатого кислорода при помощи эжектирования. Система состоит из баллона с вентилем, редуктора, трубки манометра, кислородного манометра, эжектора и крана эжектора.

Применение в данном приборе датчиков непосредственной регистрации определяет неудобство практического использования, обусловленное конструктивным исполнением датчиков. Так, зачастую происходит пролив спирта из наклонного манометра при неправильно установленных органах управления, поломка рукояток регулировки. Также данный прибор не позволяет автоматически регистрировать параметры респираторов и их статистически обрабатывать.

В 2009 г. для замены устаревших приборов УКП-5 в ЦНИЛ филиала ВГСЧ Урала разработан индикатор для проверки респираторов ИПР-Э с использованием электронных датчиков давления и температуры, позволяющий проверять герметичность воздухопроводной системы при избыточном и вакуумметрическом давлении, определять объем постоянной подачи кислорода редуктором, давление, при котором работает лёгочный автомат, давление, при котором работает избыточный клапан, объем подачи кислорода аварийным клапаном [1].

В данном индикаторе заменены жидкостные, стрелочные и поплавковые измерители давления и расхода тензометрическим полупроводниковым датчиком, обеспечивающим с помощью электронного блока вывод показаний на цифровое табло – давление газовой среды или расход газа. В схему встроены электронный секундомер, который служит для отсчета времени при проверке герметичности респиратора.

В индикаторе ИПР-Э применен регулируемый газоздушный насос реверсивного типа, обеспечивающий создание и плавное регулирование необходимого потока воздуха от 0 до 10 дм<sup>3</sup>/мин и давления (разряжения) в системе, что приводит к экономии кислорода при проверке респиратора.

В Российской Федерации разработан прибор УКП-8, предназначенный для проверки основных эксплуатационных параметров кислородных изолирующих регенеративных респираторов «Урал-10», Р-30, Р-30М, Р-34, аппаратов искусственной вентиляции легких «Горноспасатель-10», находящихся на боевом расчете горноспасательных и газоспасательных служб.

Принцип действия прибора УКП-8 основан на измерении температуры окружающей среды, интервала времени, а также давления и расхода газа в газораспределительной системе для проверки респираторов при различных положениях маховиков кранов и тумблеров. Результаты измерений отображаются на цифровых индикаторах. При измерении расхода кислорода

автоматически учитывается атмосферное давление и температура окружающей среды [2].

Однако указанные приборы дорогостоящие и не позволяют производить проверки в автономном режиме, используя в качестве источника пневматической энергии баллон со сжатым воздухом.

**Результаты исследований.** При разработке нового универсального прибора для проверки респираторов с использованием современных электронных датчиков давления и температуры, с применением современной элементной базы разработаны блок-схемы контрольного прибора, проанализированы существующие типы и модели датчиков.

Блок-схема (рис. 1) в качестве источника избыточного и вакуумметрического давления предусматривает использование воздушного насоса нереверсивного типа, в котором изменение знака создаваемого давления определяется наличием альтернативных воздухопроводных путей с переключающей (запорной) арматурой или баллона со сжатым воздухом (рис. 2). Обязательным является наличие в составе блок-схемы клапана избыточного давления, который обеспечивает сброс воздуха, подаваемого насосом, при достижении требуемого избыточного давления (в промежутке времени между закрытием крана и выключением насоса) и при проверке срабатывания легочного автомата.

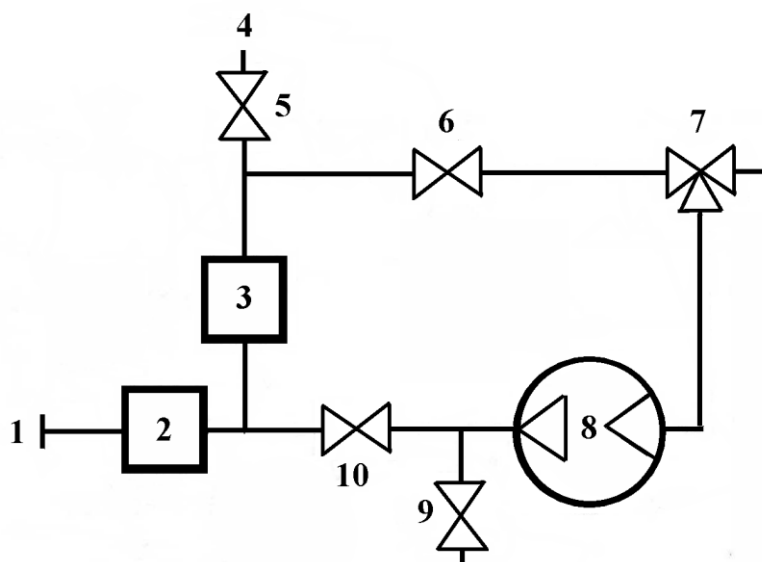


Рис. 1. Блок-схема разрабатываемого универсального контрольного прибора с воздушным компрессором:

1 – штуцер подключения респиратора; 2 – прибор для измерения давления; 3 – прибор для измерения расхода; 4 – штуцер для сброса воздуха; 5 – вентиль; 6 – кран регулировки; 7 – кран трехходовой; 8 – воздушный компрессор; 9 – избыточный клапан; 10 – вентиль

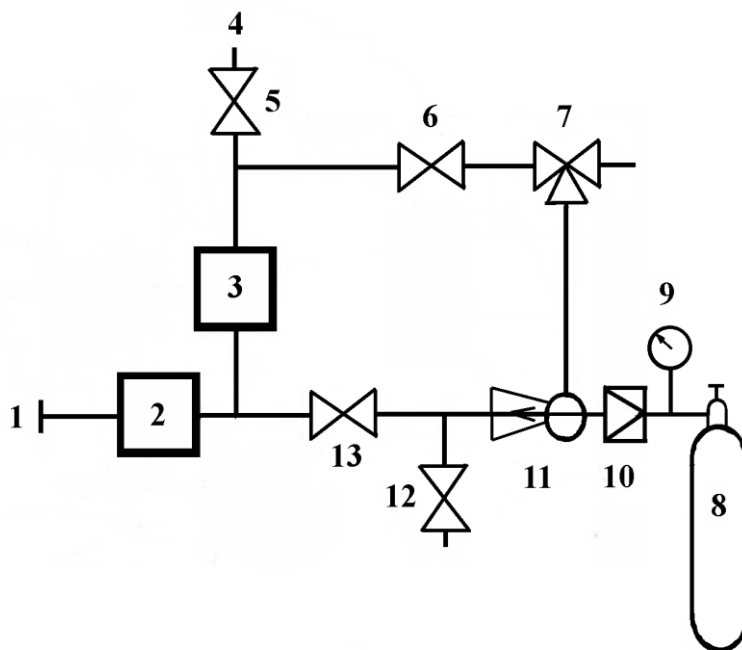


Рис. 2. Блок-схема разрабатываемого универсального контрольного прибора с баллоном со сжатым воздухом:

1 – штуцер подключения респиратора; 2 – прибор для измерения давления; 3 – прибор для измерения расхода; 4 – штуцер для сброса воздуха; 5 – вентиль; 6 – кран регулировки; 7 – кран трехходовой; 8 – баллон со сжатым воздухом; 9 – манометр, 10 – редуктор, 11 – эжектор, 12 – избыточный клапан; 13 – вентиль

Разрабатываемый универсальный контрольный прибор позволяет производить следующие виды проверок:

- контроль герметичности респиратора при избыточном давлении;
- проверка объема постоянной подачи кислорода редуктором респиратора;
- определение давления, при котором срабатывает избыточный клапан респиратора;
- проверка срабатывания легочного автомата;
- контроль герметичности респиратора при вакуумметрическом давлении;
- проверка подачи кислорода аварийным клапаном;
- определение подачи кислорода легочным автоматом отдельно от респиратора;
- определение расхода кислорода устройством аварийной подачи отдельно от респиратора.

В результате анализа стоимости и технических характеристик существующих датчиков давления сделан выбор в пользу тензометрических датчиков, производимых НПП «Пьезоэлектрик» и компанией «ОВЕН».

В тензометрических датчиках при механическом напряжении и деформации изменяется удельное сопротивление  $\rho$ , что приводит к изменению сопротивления проводника [3]:

$$R = \rho l / Q, \quad (1)$$

где  $R$  – сопротивление, Ом;

$\rho$  – удельное сопротивление, Ом·м;

$l$  – длина, м;

$Q$  – площадь поперечного сечения проводника, м<sup>2</sup>.

Основной характеристикой применяемых в тензорезисторных датчиках материалов является тензочувствительность [4], определяемая по формуле

$$S = \frac{\Delta R / R}{\Delta l / l}, \quad (2)$$

где  $S$  – коэффициент тензочувствительности;

$R$  – сопротивление, Ом;

$l$  – длина тензочувствительного элемента, м.

Коэффициент тензочувствительности может быть представлен в виде слагаемых  $S_1$  и  $S_2$  [2]:

$$S = S_1 + S_2; \quad (3)$$

$$S_1 = 1 + 2\mu; \quad (4)$$

$$S_2 = \frac{\Delta P / P}{\Delta l / l}, \quad (5)$$

где  $\mu$  – коэффициент Пуассона; для металлов  $\mu = 0,2 \dots 0,4$ ;

$S_1$  – параметр, характеризующий изменение геометрических размеров;

$S_2$  – параметр, характеризующий изменение электрических свойств материала при деформациях.

Датчики давления модели 415 (НПП «Пьезоэлектрик») [5] модельного ряда 5XXX имеют многофункциональный микропроцессорный электронный блок с расширенными возможностями, позволяющими архивировать в энергонезависимой памяти по различным алгоритмам 1000 последних значений измеренного параметра. Многофункциональный индикаторный блок с дисплеем и клавиатурой управления предоставляет возможность в рабочем режиме визуально контролировать текущее значение измеряемого параметра в установленных единицах, что позволяет отказаться от вторичного регистрирующего прибора, значительно упрощая и удешевляя конструкцию, а также сделать мобильный вариант конструкции прибора. Применение же вторичного регистрирующего прибора предоставит возможность

архивирования информации и дополнительного её анализа (набор статистики по каждому из проверяемых параметров каждого аппарата).

Применение датчиков ПД100И (компании «ОВЕН») [6] без внешней индикации измеряемых параметров усложняет разработку прибора, но позволяет провести более гибкую их адаптацию в схему универсального контрольного прибора (рис. 3).

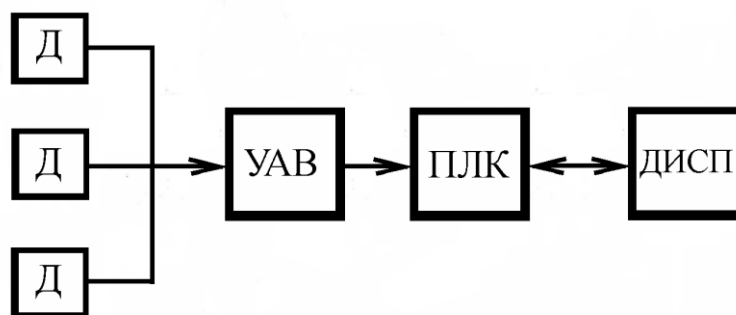


Рис. 3. Блок-схема электронной части варианта универсального контрольного прибора с датчиками без внешней индикации измеряемых параметров:

Д – датчики давления и расхода; УАВ – устройство аналогового ввода;  
ПЛК – программируемый логический контроллер; ДИСП – дисплей

Помимо датчиков, компания «ОВЕН» предлагает электронные компоненты, необходимые для универсального контрольного прибора.

Для применения в универсальном контрольном приборе в качестве электронного расходомера необходим датчик, обладающий исключительными характеристиками: для возможности проверки подачи кислорода редуктором и легочным автоматом расходомер должен иметь широкий диапазон измерений (от 0,1 до 10 дм<sup>3</sup>/мин и от 60 до 160 дм<sup>3</sup>/мин – у респиратора Р-30). Такие требования к датчикам значительно сужают номенклатуру моделей, которые могут быть применены.

Из разнообразных типов расходомеров по своим массогабаритным характеристикам, надёжности и диапазону измерений оптимальным является применение калориметрических и термоанемометрических датчиков.

Калориметрический датчик расхода DKR-MF5712 [7] (рис. 4) в исполнении 200 SLPM MF 5712 позволяет измерять расход воздуха от 0 до 200 дм<sup>3</sup>/мин с точностью  $\pm 2,5\%$ .

Термоанемометрический расходомер VA 550/570 (изготовитель EnE SYSTEM, Корея) [8] в high speed-версии измеряет от 0,1 до 224 Нм/с (рис. 5). С помощью прибора PI 500 или ПО Service Software на дисплей можно выводить следующие параметры: расход газа в различных единицах измерения, тип газа, внутренний диаметр, референтные условия (°C/°F, мбар/гПа) и др.



Рис. 4. Датчик расхода воздуха  
DKR-MF5712



Рис. 5. Погружной расходомер VA 570

Предлагаемые на современном рынке датчики расхода имеют устройства внешней индикации измеряемых параметров и могут самостоятельно после обработки сигнала представлять результаты измерений. Помимо этого датчик расхода воздуха DKR-MF5712 имеет аналоговый выходной сигнал (от 4 до 20 мА). Погружные расходомеры сжатого воздуха VA 550/570 имеют аналоговые (4...20 мА) и цифровые сигналы (Modbus RTU, Modbus TCP и др.), которые можно подключать ко входам программируемого логического контроллера с последующей индикацией на жидкокристаллическом дисплее.

В качестве источника пневматической энергии разработанная блок-схема позволяет использование двух вариантов, таких, как баллон со сжатым воздухом, что позволяет эксплуатировать аппарат без привязки к электрической сети, и электрического побудителя расхода (компрессора). Предложенное решение даёт возможность создания двух модификаций прибора – стационарного, с возможностью его подключения к компьютеру для сохранения, систематизирования, накопления и статистической обработки основных технических параметров каждого из испытываемых респираторов Р-30 с привязкой к серийному номеру и дате выпуска каждого изделия, что позволит прогнозировать время наработки на отказ, и мобильного, позволяющего проводить проверку в мобильном режиме, при невозможности использования стационарных сетей электрического питания.

Баллон со сжатым воздухом в настоящее время применяется в контрольном приборе УКП-5, поэтому его использование не предусматривает каких-либо изменений принципиальной схемы. В случае применения электрического побудителя расхода необходимо определиться с его объёмным расходом и развиваемым избыточным давлением компрессора. Предлагаемый к применению компрессор должен обеспечивать чистоту подаваемого воздуха, т.е. быть безмасляным либо оснащаться фильтром для поглощения паров масел и других вредных примесей.

По техническим характеристикам для универсального контрольного прибора среди представленных на рынке образцов наиболее подходящими являются воздушные компрессоры фирмы SunSun модели АСО-012 (расход воздуха – не менее 150 дм<sup>3</sup>/мин, создаваемое давление 0,042 МПа, масса 4,8 кг).

**Выводы.** Проведенные исследования позволили разработать блок-схему универсального контрольного прибора для проверки респираторов, определить необходимые технические характеристики применяемых электронных компонентов, позволяющих создать мобильную (переносную) и стационарную модификацию прибора. Блок-схема универсального контрольного прибора позволяет применять датчики с внешней индикацией в качестве готовых изделий и датчики без внешней индикации в качестве отдельных электронных компонентов, работающих в составе комплекса, в основе которого предполагается применение цифрового контроллера, обеспечивающего связь с персональным компьютером для индикации и накопления данных основных технических параметров респираторов Р-30.

#### Список литературы / References

1. ИПР-Э индикатор проверки респираторов электронный [Электронный ресурс]. URL: [https://www.zaogst.ru/gst\\_041.htm](https://www.zaogst.ru/gst_041.htm) (дата обращения: 07.03.2019).

*ИПР-Э indikator proverki respiratorov elektronnyy* [The ИПР-Э electronic indicator for control of breathing apparatus] [Electronic resource]. Available at: [https://www.zaogst.ru/gst\\_041.htm](https://www.zaogst.ru/gst_041.htm) (accessed 07.03.2019).

2. УКИ-8 универсальный контрольный прибор [Электронный ресурс]. URL: [https://www.zaogst.ru/gst\\_045.htm](https://www.zaogst.ru/gst_045.htm) (дата обращения: 07.03.2019).

*УКИ-8 universal'nyy kontrol'nyy pribor* [The УКИ-8 universal control device] [Electronic resource]. Available at: [https://www.zaogst.ru/gst\\_045.htm](https://www.zaogst.ru/gst_045.htm) (accessed 07.03.2019).

3. Измерение электрических и неэлектрических величин / Н.Н. Евтихийев, Я.А. Купершмидт, В.Ф. Папуловский, В.Н. Скаторов; под общ. ред. Н.Н. Евтихьева. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.

*Yevtikhiyev, N.N., Kupershmidt, Ya.A., Papulovskiy, V.F., Skutorov, V.N.; Yevtikhiyev, N.N., ed. Izmereniye elektricheskikh i neelektricheskikh velichin* [Measurement of electrical and non-electrical quantities]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1990, 352 p.

4. Сошинов, А.Г. Преобразователи неэлектрических величин / А.Г.Сошинов. – Волгоград: ВолгГТУ, 2002. –36 с.

Soshinov, A.G. *Preobrazovateli neelektricheskikh velichin* [Transducers of non-electrical quantities]. Volgograd, VolgGTU Publ., 2002, 36 p.

5. Датчики давления 415, интеллектуальные модели 5XXX [Электронный ресурс]. URL: <https://www.piezoelectric.ru/Products/TransmitterPressure/415mod5xxx.php> (дата обращения: 07.03.2019).

*Datchiki davleniya 415, intellektual'nyye modeli 5XXX* [Pressure sensors 415, 5XXX intellectual models] [Electronic resource]. Available at: <https://www.piezoelectric.ru/Products/TransmitterPressure/415mod5xxx.php> (accessed 07.03.2019).

6. Преобразователи давления [Электронный ресурс]. URL: [https://www.owen.ru/catalog/datchiki\\_preobrazovateli\\_davleniya](https://www.owen.ru/catalog/datchiki_preobrazovateli_davleniya) (дата обращения: 07.03.2019).

*Preobrazovateli davleniya* [Pressure transducers] [Electronic resource]. Available at: [https://www.owen.ru/catalog/datchiki\\_preobrazovateli\\_davleniya](https://www.owen.ru/catalog/datchiki_preobrazovateli_davleniya) (accessed 07.03.2019).

7. DKR-MF57. Измеритель расхода потока воздуха, расходомер воздуха на трубопровод [Электронный ресурс]. URL: <https://www.energometrika.ru/catalog/dkr-mf57-rele-potoka-vozdukha-raskhodomer-vozdukha.html> (дата обращения: 07.03.2019).

*DKR-MF57 – Izmeritel' raskhoda potoka vozdukha, raskhodomer vozdukha na truboprovod* [The DKR-MF57 – Air flow meter, air meter for a pipeline] [Electronic resource]. Available at: <https://www.energometrika.ru/catalog/dkr-mf57-rele-potoka-vozdukha-raskhodomer-vozdukha.html> (accessed 07.03.2019).

8. Расходомеры VA 550 и VA 570 с интерфейсом Ethernet [Электронный ресурс]. URL: <http://izmerkon.ru/about/news/va-550-i-va-570-s-ethernet.html> (дата обращения: 07.03.2019).

*Raskhodometry VA 550 i VA 570 s interfeysom Ethernet* [The VA 550 and VA 570 flow meters with an Ethernet interface] [Electronic resource]. Available at: <http://izmerkon.ru/about/news/va-550-i-va-570-s-ethernet.html> (accessed 07.03.2019).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 11.03.2019

*Lyubov Alekseyevna Zborshchik, acting head of department; e-mail: [oszd\\_niigd\\_1@mail.ru](mailto:oszd_niigd_1@mail.ru);*

*Ruslan Sergeyeovich Pletenetskiy, scientific associate; e-mail: [zoloto-russland@yandex.ru](mailto:zoloto-russland@yandex.ru);*

*Aleksandr Vitalyevich Chapkovich, engineering manager; e-mail: [niigd.osmas-2@mail.ru](mailto:niigd.osmas-2@mail.ru);*

*Viktor Ivanovich Frantsev, advanced engineer; e-mail: [oszd\\_niigd\\_3@mail.ru](mailto:oszd_niigd_3@mail.ru)*

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

*283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-45*

## **AN UNIVERSAL CONTROL DEVICE FOR TESTING BREATHING APPARATUS**

**Purpose.** Investigation of a possibility of working-out the universal control device for testing the breathing apparatus in compliance with modern requirements.

**Methods.** Theoretical investigations.

**Results.** The block diagram of the universal control device for testing the breathing apparatus assuming the use of up-to-date electronic components in measuring circuits, conversion, indication and accumulation of a data array of operational characteristics of the P-30 breathing apparatus with which the subdivisions of the State Para-military Mine-rescue Service of the Ministry of Emergency Situations (DPR) are equipped has been created.

**Scientific novelty.** The block diagram of the universal control device for testing the breathing apparatus with the use of modern electronic sensors and transducers of measured physical quantities in the electrical ones providing for accumulation and analysis of the obtained data has been worked out.

**Practical value.** The obtained results of the investigations will permit to work out the universal control device for testing the P-30 breathing apparatus in compliance with the modern requirements using the up-to-date electronic components that allow measuring, converting, indicating and accumulating the array of the parameters which are necessary for the future regulation.

**Keywords:** *control device; breathing apparatus; pressure sensor; vacuum sensor; flow meter.*

## Требования к оформлению статьи

К рассмотрению принимаются статьи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи статьи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступлением 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

*Структура статьи:*

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и электронная почта, название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;
- реферат (от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель; методика; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (5–15 слов) на русском и английском языках, реферат не должен повторять названия статьи;

- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации;
- раздел журнала для размещения статьи.

*Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:*

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи;
- описание методики (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

*Объем статьи*, включая текст, таблицы, рисунки, должен быть от 7 до 9 страниц. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

*Рисунки (диаграммы, фото и др.)* располагаются вместе с текстом в местах ссылок на них. Подписи к рисункам должны содержать нумерацию в порядке размещения в тексте и объяснительную подпись. Недопустимо включать подписи в сам рисунок.

*Формулы* в статьях должны быть набраны с помощью редактора формул (внутренний редактор формул в редакторе Microsoft Word for Windows или Microsoft Equation), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом. Нумерация формул, на которые есть ссылка в тексте, – справа в скобках. Все физические величины приводятся в системе СИ.

*Таблицы* – в книжной ориентации, они должны иметь тематические заглавия и номера, фон таблицы другим цветом не выделяют. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

*Список литературы* (не более 15 источников с датой их издания не ранее чем за 10 лет и количеством самоссылок до 20 %) приводится в порядке упоминания в тексте.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Ответственность за содержание статьи несет автор. Предоставленные материалы не возвращаются.

**Статьи, которые не отвечают требованиям редакции, не рассматриваются.**

# Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал  
2019, № 2(56)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик О.А. Шестакова

Верстальщик Т.Н. Филатова

Учредитель и издатель

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

**Поступившие на издание статьи проходят рецензирование**

Подписано к использованию 28.03.2019.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+ 38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 3,35 Мб

E-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru)

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

**Дата размещения на сайте 4 апреля 2019 г.**