



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

№ 4(57)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 4(57). – 111 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 7 от 29.10.2020).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”

Scientific-technical journal

No. 4(57)

Published quarterly

Founded in 1970

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2020. – No. 4(57). – 111 p.

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

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

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

Editorial board:

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

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 7 from 29.10.2020).

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

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

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

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

Агеев В.Г., Греков С.П., Гусар Г.А.
Расчет параметров реакционной
поверхности угля 7

**Коврижкин О.И., Дикенштейн И.Ф.,
Буряк Д.С.**
Заполнение газообразным азотом
изолированного пространства горной
выработки 17

**Козлитин А.А., Лебедева В.В.,
Непочатых И.Н.**
Покрытия на основе минерального
связующего для огнезащиты
деревянных конструкций 26

**Момот Д.И., Полунин С.А.,
Еремин А.В.**
Усовершенствованный высоконапорный
трубный пеногенератор 33

**Шаповалов В.В., Берестовая А.А.,
Шлома В.В.**
Инструментальное определение
термической устойчивости материалов 43

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

**Агарков Ан.В., Лопатина Е.В.,
Дикенштейн И.Ф., Калиниченко Н.А.**
Повышение эффективности ликвидации
снежных заносов 54

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

Ageyev V.G., Grekov S.P., Gusar G.A.
Calculation of parameters of coal reaction
surface 7

**Kovrizhkin O.I., Dikenshteyn I.F.,
Buryak D.S.**
Filling a sealed area of a mine working
with the gaseous nitrogen 17

**Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.,
Nepochatykh I.N.**
Coatings based on a mineral binder
for fire retardation of wooden constructions 26

**Momot D.I., Polunin S.A.,
Yeryomin A.V.**
Improved high-pressure pipe foam
generator 33

**Shapovalov V.V., Berestovaya A.A.,
Shloma V.V.**
Instrumental determination
of thermal stability of materials 43

II. Safety in emergencies

**Agarkov An.V., Lopatina Ye.V.,
Dikenshteyn I.F., Kalinichenko N.A.**
Effectiveness improvement of removal
of snowdrifts 54

Головченко Е.А.

Химическая активность угля и его инкубационный период самовозгорания при образовании скоплений угольной пыли

66

Golovchenko Ye.A.

Chemical activity of coal and its incubation period of spontaneous ignition during formation of coal dust accumulations

Иваненко А.Ф., Мухин П.Е.

Влияние человеческого фактора на безопасное функционирование производственных объектов

73

Ivanenko A.F., Mukhin P.Ye.

Influence of the human factor on the safe functioning of production facilities

Чернышев В.А., Чайковская Э.Г., Зинченко Н.Г.

Устройство для дистанционного закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемышках

80

Chernyshev V.A., Chaykovskaya E.G., Zinchenko N.G.

A device for closing hatches of entry pipes remotely in explosion-resistant stoppings

III. Охрана труда и экологическая безопасность

III. Labor protection and environmental safety

Мамаев В.В., Зборщик Л.А., Плетенецкий Р.С., Кирьян А.П.

Регенеративный процесс в изолирующем дыхательном аппарате с химически связанным кислородом

87

Mamayev V.V., Zborshchik L.A., Pletenetskiy R.S., Kiryan A.P.

Regeneration process in a self-contained breathing apparatus, chemical oxygen type

Симонов А.М., Карнаух Н.В., Агарков Ал.В., Мавроди А.В.

Проветривание малых угледобывающих предприятий при ведении аварийно-спасательных работ

95

Simonov A.M., Karnaukh N.V., Agarkov Al.V., Mavrodi A.V.

Ventilation of small coal mining enterprises during carrying-out the emergency and rescue operations

Гуржий В.В., Березин А.А., Искрук С.В.

Практическая значимость Атласа по определению признаков аварийных режимов работы электрооборудования

103

Gurzhii V.V., Berezin A.A., Iskruck S.V.

Practical value of the Atlas for determination of indicators of emergency states of the electric equipment operation

Требования к оформлению статьи

110

Requirements of execution of an article

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 622.822.22:001.891.572

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

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

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-79-07

Геннадий Анатольевич Гусар, канд. техн. наук, доц.; e-mail: math@donntu.org

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-09-01

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ УГЛЯ

Цель. Разработка метода расчета реакционной поверхности угля, на которой происходит реакция его окисления, и константы скорости образования поверхностного комплекса для уточнения динамики температуры самонагрева в угольном скоплении.

Методика. Математическое моделирование динамики температуры самонагрева угля при постоянных и переменных параметрах образования и стока теплоты, исследование зависимости его реакционной поверхности.

Результаты. Получено аналитическое выражение для расчета скорости образования поверхностного комплекса в процессе сорбции кислорода, которое учитывает динамику параметров, обуславливающих теплообменные процессы, и размеры скопления угля. Установленная зависимость, описывающая гетерогенное окисление углей, позволяет разработать метод вычисления реакционной поверхности твердого топлива в процессе его самонагрева.

Научная новизна. Предложен метод расчета параметров окисления угля, изменяющихся во времени, который учитывает теплообмен с окружающей средой и повышает точность определения температуры скопления твердого топлива.

Практическая значимость. Повышение точности расчета температуры углей, оставленных в выработанном пространстве, позволит своевременно принять меры по предупреждению опасности возникновения эндогенного пожара.

Ключевые слова: низкотемпературное окисление; реакционная поверхность; скорость реакции; тепловыделение и теплоотдача; скопление угля.

Состояние вопроса и постановка задачи исследования. В работе [1] проанализированы используемые в настоящее время математические модели самовозгорания угля. Показано, что предлагаемая модель и ее квазистационарное решение более приемлемо в расчетах и обладает рядом преимуществ, заключающихся в использовании переменных во времени параметров генерации и стока теплоты, а также изменения температуры угля в результате дросселирования из него метана и испарения влаги. Решение получено в виде

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

где T_0 – начальная температура угля, К;
 Q – удельное количество теплоты, Дж/(м³·с);

$$Q = Q_{ок} - Q_M - Q_B = \xi C_{O_2} v_q - \delta q_{др} J_M - 0,556 q_B k_B W^a \rho_y; \quad (2)$$

ξ – часть реакционной поверхности угля;
 C_{O_2} – концентрация адсорбированного углем кислорода, моль/м³;
 v_q – скорость выделения теплоты, Дж/(с·моль);
 δ – доля выделяющегося метана;
 $q_{др}$ – теплота дросселирования из угля метана, Дж/моль;
 J_M – интенсивность выделения метана из угля, моль/(м³·с);
 q_B – теплота испарения влаги, Дж/моль;
 k_B – константа скорости испарения влаги, с⁻¹;
 W^a – массовая доля влаги в аналитической пробе угля, %;
 ρ_y – плотность угля, кг/м³;
 S – площадь поперечного сечения скопления угля, м²;
 Π – периметр скопления угля, м;
 α – коэффициент теплообмена, Вт/(м²·К).

В то же время параметр ξ , входящий в выражение для Q и характеризующий часть поверхности угля, на которой протекает реакция окисления, был найден ранее [2] как некоторое среднее значение $\xi_{ср}$ путем сравнения вычисленного инкубационного периода самовозгорания угля с периодом, определенным по разработанным статистическим зависимостям с использованием формулы

$$\xi_{ср} = 1 - \frac{1 - \exp(-v\tau)}{v\tau} + \left(\frac{v}{\mu - v} \right) \frac{1}{\tau} \left[\frac{1 - \exp(-\mu\tau)}{\mu} - \frac{1 - \exp(-v\tau)}{v} \right], \quad (3)$$

где v – константа скорости образования поверхностного комплекса, с⁻¹;
 τ – время с момента разрушения угольного пласта, с;
 μ – константа скорости перехода метана из связанного состояния в свободное, с⁻¹.

В процессе окисления угля величина ξ переменная, которую определяют из выражения, приведенного в работе [3]:

$$\xi = 1 - \exp(-v\tau) + \left(\frac{v(1 - \eta_0)}{\mu - v} \right) [\exp(-\mu\tau) - \exp(-v\tau)]. \quad (4)$$

В проведенных ранее исследованиях [2] установлены зависимости $\xi_{ср}$ и других параметров выражения (3) от времени, энергии активации и массового выхода летучих веществ. Это позволило определить динамику температуры, сопоставимую с другими методиками.

Тем не менее, учитывая изменение ξ во времени и полученные новые экспериментальные данные по истечению метана из угля и его охлаждению, целесообразно считать значение $\xi_{\text{ср}}$ как нулевое ее приближение, т.е. $\xi_{\text{ср}} = \xi^{(0)}$, и найти метод расчета $\xi = \xi(\tau)$ для определения температуры самонагрева угля и его инкубационного периода.

Цель работы – разработать метод расчета поверхности угля, на которой протекает реакция его окисления, и установить константы скорости образования поверхностного комплекса для определения динамики температуры самонагрева угольного скопления.

Материалы и результаты исследований. Для достижения поставленной цели будем считать, что при окислении угля изменение реакционной поверхности во времени связано с параметрами, входящими в зависимость (1), такими как теплота и константа скорости реакции окисления, концентрация кислорода в угле, теплота дросселирования метана и испарения влаги, коэффициент теплоотдачи.

Учитывая, что значения ξ , представленные ранее в работе [2], рассчитаны при постоянных параметрах, перечисленных выше, кроме концентрации кислорода, примем $\xi = \xi_{\text{ср}} = \xi^{(0)}$ – нулевое приближение. Тогда для проверки гипотезы изменения параметра ξ во времени и влияния его на температуру самонагрева рассмотрим экспериментальные данные НИИГД по насыщению угля пласта k_5 с выходом летучих веществ V^{daf} , равным 6 %, шахты «Коммунарская» метаном, последующему сбросу с него давления и расчету температуры по двум методам: с постоянными и переменными параметрами окисления. Сравнение расчетов позволит определить значения $\xi = \xi^{(1)}$, т.е. их первое приближение, и вычислить константу скорости образования поверхностного комплекса.

Согласно уравнению (1) в работе [1] для исследуемого угля установлена динамика температуры его самонагрева в нулевом приближении $T^{(0)}$ при следующих начальных данных: $T_0 = 298 \text{ K}$; $V^{\text{daf}} = 6 \text{ \%}$; $W^a = 1,2 \text{ \%}$; $D = 1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$; $k_d = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$; $D_p = 9$; $S/\Pi = 0,05 \text{ м}$; $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; $c = 1500 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $\alpha = 0,29 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{K)}$; $\xi_{\text{ср}} = 0,0053$.

Для вычисления температуры угля в первом приближении $T^{(1)}$ анализ переменных параметров уравнения (1) показывает, что основной параметр, характеризующий нагревание угля, Q – удельное количество теплоты, обусловленное окислением угля, дросселированием метана и испарением влаги.

Теплоту, выделяющуюся в результате окисления, представим в виде

$$Q_{\text{ок}} = \xi^{(0)} C_{\text{O}_2} v_q, \quad (5)$$

где $\xi^{(0)}$ – нулевое приближение параметра ξ , равное $\xi^{(0)} = 0,0053$.

Выражение для концентрации кислорода C_{O_2} при условии, что процесс окисления угля в шахтах не лимитирован скоростью адсорбции, запишем в виде [4]

$$C_{O_2} = \frac{\gamma C_{ст}}{1 + (\Gamma_d / \mu_d^2)}, \quad (6)$$

где γ – константа Генри;
 $C_{ст}$ – концентрация кислорода в воздухе, окружающем скопление, моль/м³;
 $\Gamma_d = kR^2/D$ – диффузионный критерий скорости химической реакции;
 k – константа скорости окисления, с⁻¹;
 R – радиус частиц угля, м;
 D – коэффициент диффузии кислорода, м²/с;
 μ_d^2 – параметр, зависящий от критерия Био ($\mu_d^2 = 3Bi_d$).

Скорость выделения теплоты v_q исследована в работе [5], и установлена зависимость ее от константы скорости химической реакции в виде

$$v_q = 6980k^{0,18}. \quad (7)$$

Исследования константы скорости окисления угля [5] с учетом времени напорного выделения метана (в среднем – трое суток) позволили установить следующие зависимости:

$$0 < \tau \leq 3 \text{ сут}; \quad k = 7,5 \cdot 10^{-5} + 2,37 \cdot 10^{-5} (\tau + 1)^{0,325}; \quad (8)$$

$$\tau \geq 3 \text{ сут}; \quad k = k_d / (1 + 2,22 \cdot 10^{-5} \tau), \quad (9)$$

где k_d – константа скорости окисления, найденная в лабораторных условиях, с⁻¹.

Удельное количество теплоты, обусловленное дросселированием метана из угля, определяют из выражения с известными параметрами

$$Q_M = 630(Dp - 1)^{1,3} \frac{G}{\tau_H(V^{daf} + 1)}, \quad (10)$$

где Dp – дробимость угля;

τ_H – время напорного выделения метана из угля, с.

Удельное количество теплоты, обусловленное испарением влаги, находим по формуле

$$Q_B = 0,556 q_B k_B W^a \rho_y. \quad (11)$$

Из анализа зависимостей (2), (5) – (11) следует, что основной источник генерации теплоты – реакция окисления угля, протекающая на доступной для этого поверхности, характеризуемой ξ и зависящей от констант ν и μ .

Рассмотрим стоки теплоты, обусловленные теплоотдачей от скопления угля в окружающую среду. Подробный анализ зависимостей для расчета параметров тепло- и массообмена в самонагревающемся угле, изложенный в работах [6, 7], показал, что коэффициент теплообмена как функция скорости потока не зависит от температуры и времени. По данным акад. А.Н. Щербаня, коэффициент теплообмена уменьшается для условий, когда вскрытая поверхность угля остывает, т.е. $\alpha = f(\tau)$. В нашем случае разность температуры нагревающегося угля и окружающей среды растет, что приводит к увеличению α . Поэтому для вычисления коэффициента теплообмена в первом приближении $\alpha^{(1)}$ использована формула П.Г. Романкова в виде

$$\alpha^{(1)} = 0,0068 S_V + 1,9 v^{0,48} S_V^{0,52} \left(\frac{\Theta - T}{T} \right)^{0,175}, \quad (12)$$

где v – пожароопасная скорость воздуха, м/с; принята равной $4 \cdot 10^{-4}$ м/с;
 $S_V = S_{\text{ч}}/V$ – удельная сорбционная поверхность пожароопасного скопления угля, м^{-1} .

Для скопления, характеризуемого диаметром, изменение коэффициента теплообмена от начала самонагрева угля с использованием динамики температуры, рассчитанной при постоянных параметрах окисления и отвода теплоты $T_{\tau}^{(0)}$, имеет вид

$$\alpha^{(1)} = 0,0068 \frac{6}{d} + 1,9 v^{0,48} (6/d)^{0,52} \left(\frac{T_{\tau}^{(0)} - T}{T} \right)^{0,175}. \quad (13)$$

Для установления динамики коэффициента теплообмена определим зависимость величины $\left[(T_{\tau}^{(0)} - T) / T \right]^{0,175}$ от времени и представим выражение (13) в виде

$$\alpha^{(1)} = 0,041 / d + 0,148 v^{0,48} (6/d)^{0,52} \tau^{0,144}. \quad (14)$$

Значения $\alpha^{(1)}$, рассчитанные по формулам (12) и (14), в среднем отличаются не более чем на 2 %, что позволяет использовать зависимость $\alpha = f(\tau)$ в виде (14) для дальнейшего определения температуры.

Используя переменные параметры генерации и стока теплоты в скоплении угля, рассчитали значения температуры в первом приближении (см. таблицу), которые более точно описывают процесс нагревания угля. Найденные моделированием теоретические зависимости константы скорости образования поверхностного комплекса позволяют, совместно с константой скорости выделения метана, рассчитать часть реакционной поверхности угля, участвующей в низкотемпературном окислении.

Проанализируем динамику константы скорости образования поверхностного комплекса v , рассчитанную из выражения (4) по значениям ξ и μ , и установим

ее функциональную зависимость от концентрации кислорода и константы скорости окисления угля с учетом коэффициента теплообмена. Полученные результаты представлены на рисунке и могут быть использованы для последующего расчета реакционной поверхности конкретного угля. Однако зависимость (16) с учетом размера скопления угля наиболее полно отражает процесс теплообмена с окружающей средой и взята за основу для дальнейших исследований самовозгорания твердого топлива.

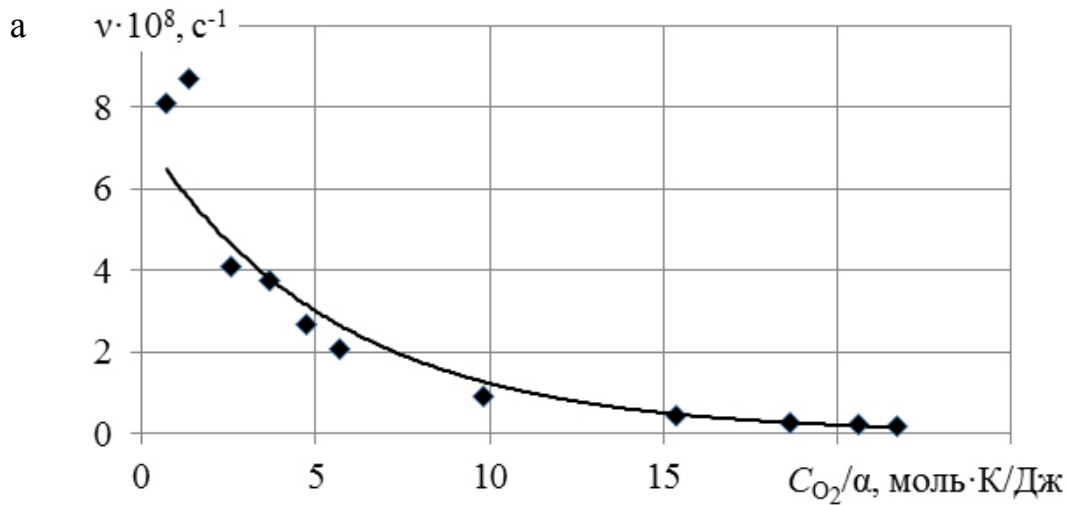
Параметры источников и стоков теплоты и температура угля
в нулевом и первом приближении

Параметр	Время, сут					
	1	3	5	10	20	30
Температура при постоянных параметрах $T_{\tau}^{(0)}$, К	298,9	301,8	304,4	309,9	317,9	322,9
Концентрация кислорода C_{O_2} , моль/м ³	0,417	1,197	1,909	3,429	5,602	6,979
Константа скорости окисления $k \cdot 10^4$, с ⁻¹	0,015	2,132	1,360	0,714	0,366	0,246
Константа скорости выделения метана $\mu \cdot 10^5$, с ⁻¹	1,324	0,716	0,538	0,365	0,247	0,197
Константа скорости образования поверхностного комплекса $\nu \cdot 10^8$, с ⁻¹	8,312	2,355	2,242	1,409	0,586	0,308
Коэффициент теплообмена при переменных параметрах $\alpha^{(1)}$, Вт/(м ² ·К)	0,308	0,326	0,335	0,349	0,365	0,374
Температура при переменных параметрах $T^{(1)}$, К	299,5	301,8	303,7	307,0	310,6	312,4

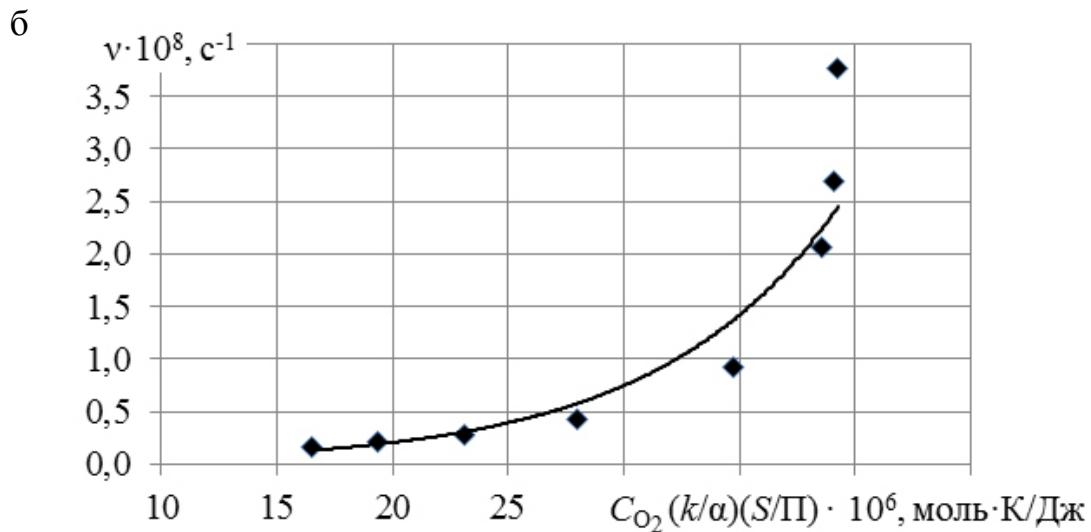
На основании выполненного анализа параметров, влияющих на самонагревание угля, определен следующий порядок обработки данных для вычисления температуры:

- лабораторные исследования химической активности угля и определение константы скорости окисления при критической температуре самовозгорания;

- расчет концентрации кислорода с использованием газоносности пласта по формуле (6);



$$v = 7,34 \cdot 10^{-8} \exp\left(-0,18 \frac{C_{O_2}}{\alpha}\right); R^2 = 0,98 \quad (15)$$



$$v = 1,62 \cdot 10^{-10} \exp\left(1,28 \cdot 10^5 \frac{C_{O_2} k S}{\alpha \Pi}\right); R^2 = 0,95 \quad (16)$$

Зависимость константы скорости образования поверхностного комплекса от параметров генерации (а) и отвода теплоты (б)

- определение коэффициента теплообмена с учетом толщины скопления угля по формуле (14);
- расчет константы скорости образования поверхностного комплекса по формуле (16);

- определение константы скорости перехода метана из связанного состояния в свободное;
- вычисление реакционной поверхности угля по формуле (3);
- расчет температуры угля по формуле (1) для различного времени окисления.

Выводы. Проанализированы параметры, определяющие выделение и сток теплоты при окислении угля в условиях горной выработки шахт. Предложен метод расчета температуры, позволяющий установить ее динамику в процессе самонагрева угля.

Список литературы / References

1. Греков, С.П. Расчет температуры самонагрева угля / С.П. Греков, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2020. – № 3(57). – С. 26 – 36.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P. *Raschyet temperatury samonagrevaniya uglya* [Calculation of coal spontaneous heating temperature]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 3(57), pp. 26 – 36.

2. Греков, С.П. Реакционная активность углей / С.П. Греков, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2015. – Вып. 52. – С. 78 – 90.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P. *Reaktsionnaya aktivnost' ugley* [Coal reaction activity]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2015, issue 52, pp. 78 – 90.

3. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: Арпи, 2012. – С. 236 – 242.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Aktual'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya* [Actual questions of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, pp. 236 – 242.

4. 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 questions of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.

5. Греков, С.П. Тепловой эффект окисления углей и эндогенная пожароопасность / С.П. Греков, П.С. Пашковский, В.П. Орликова // Уголь Украины. – 2014. – № 10. – С. 46 – 50.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., Orlikova, V.P. *Teplovoy effekt okisleniya ugley*

i endogennaya pozharoopasnost' [Heat effect of coal oxidation and spontaneous fire hazard]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2014, no. 10, pp. 46 – 50.

6. Греков, С.П. Расчет параметров тепло- и массообмена в самонагреваемом угольном скоплении / С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 26 – 33.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Raschyet parametrov teplo- i massoobmena v samonagrevayushchemsya ugol'nom skoplenii* [Calculation of heat- and mass exchange parameters in a spontaneous heating coal accumulation]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2007, issue 44, pp. 26 – 33.

7. Старикова, И.Г. Определение коэффициентов теплоотдачи от угля в окружающие среды / И.Г. Старикова // XXIII Международная научная школа им. акад. С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Алушта, 2013. – С. 360 – 364.

Starikova, I.G. *Opredeleniye koeffitsiyentov teplootdachi ot uglya v okruzhayushchiye sredy* [Determination of heat transfer coefficients from coal into the ambient environments]. *XXIII Mezhdunarodnaya nauchnaya shkola im. akad. S.A. Khristianovicha "Deformirovaniye i razrusheniye materialov s defektami i dinamicheskiye yavleniya v gornykh porodakh i vyrabotkakh"* [The 23rd International scientific school named after academician S.A. Khristianovich "Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in mine rocks and workings"]. Alushta, 2013, pp. 360 – 364.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 01.07.2020

Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior research scientist; e-mail: niigd@mail.ru
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) 332-79-07
Gennady Anatolyevich Gusar, assistant professor; e-mail: math@donntu.org
The State Educational Institution of Higher Occupational Education
“Donetsk National Technical University”
283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-09-01

CALCULATION OF PARAMETERS OF COAL REACTION SURFACE

Purpose. Elaboration of a method for calculation of the coal reaction surface where the coal oxidation reaction takes place, and that of the calculation of rate constant of surface complex formation for adjustment the dynamics of spontaneous heating temperature in a coal accumulation.

Methodology. Mathematical modeling of the coal spontaneous heating temperature dynamics with the constant and variable parameters of heat formation and heat sink, and investigation of its reaction surface dependence.

Results. The analytical expression has been obtained for calculation of surface complex formation rate during the process of oxygen sorption; the expression makes allowance for the dynamics of parameters stipulating the heat exchange processes and for the coal accumulation size. The obtained dependence which describes coal heterogeneous oxidation makes it possible to elaborate a method for calculation of the solid fuel reaction surface during the process of its spontaneous heating.

Scientific novelty. The method of calculation of coal oxidation parameters varying with time has been proposed that takes into account the heat exchange with the ambient environment and increases the precision of temperature measurement of a solid fuel accumulation.

Practical value. The improvement of temperature calculation precision of coal left in the mined-out waste will enable implementation of measures for timely prevention of the hazard of spontaneous fire occurrence.

Keywords: *low-temperature oxidation; reaction surface; reaction rate; heat release and heat transfer; coal accumulation.*

УДК 622.822.82.22*Олег Игоревич Коврижкин, командир; e-mail: metro-1973@mail.ru**Оперативный государственный военизированный горноспасательный отряд МЧС ДНР
283048, Донецк, пер. Николенко, 7. Тел. (+38 062) 343-52-64**Игорь Феликсович Дикенштейн, науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru;**Дмитрий Сергеевич Буряк, науч. сотр.; e-mail: buryak_ds@rambler.ru**Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-41*

ЗАПОЛНЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫМ АЗОТОМ ИЗОЛИРОВАННОГО ПРОСТРАНСТВА ГОРНОЙ ВЫРАБОТКИ

Цель. Определение параметров заполнения изолированного пространства аварийной горной выработки азотом, расчет интенсивности и времени подачи газообразного азота при ликвидации очагов горения.

Методика. Теоретическое исследование газодинамических процессов при заполнении изолированного пространства газообразным азотом с учетом его поглощения и утечек.

Результаты. Получены математические зависимости для расчета интенсивности подачи газообразного азота в изолированное пространство горной выработки с учетом его поглощения поверхностью выработки, возможных утечек через перемычки и трещиноватости вмещающих пород, выделения горючих газов очагом горения.

Научная новизна. Предложен алгоритм расчета параметров подачи азота в изолированный объем при учете возможных утечек.

Практическая значимость. Получены зависимости, позволяющие определять параметры подачи газообразного азота в изолированный участок аварийной горной выработки.

Ключевые слова: *газообразный азот; шахта; перемычка; поглощение; очаг горения; интенсивность; время подачи; изолированный объем.*

Постановка задачи. Увеличение газообильности горных выработок, связанное с углублением шахт, осложняет ликвидацию подземных пожаров, создавая постоянную опасность возникновения взрывов, особенно при изоляции пожарных участков.

Для предотвращения взрывов при тушении и изоляции подземных пожаров уже в течение многих десятков лет в различных угледобывающих странах Европы и Америки (США, Англия, Германия, Чехия, Россия) применяют инертные газы, в частности азот.

В последние годы подача азота в шахту с помощью комплексов, находящихся на поверхности, стала неэффективной в связи с небольшой производительностью, большим моральным и физическим износом оборудования, а также значительно возросла стоимость жидкого азота, его хранения, транспортирования и газификации [1].

С освоением технологии мембранного разделения воздуха у азота появилась новая перспектива. Начался своего рода ренессанс азотного тушения подземных пожаров.

Так, в Российской Федерации решено перейти на современные высокопроизводительные мембранные воздухоразделительные азотные станции. Объединение «Прокопьевскуголь» приобрело мембранную воздухоразделительную азотную установку МВА-1,6-99-250-В1-к производства ЗАО «Грасис» (Москва) производительностью по газообразному азоту 250 м³/ч (4,2 м³/мин) и его объемной долей в смеси до 99 % для шахты «Красногорская» и две мембранные воздухоразделительные азотные установки МВА-1,4-97-1000-В1К-ПУ производительностью по азоту до 100 м³/ч (1,6 м³/мин) с объемной долей азота в смеси 97 % для шахт им. К.Е. Ворошилова и «Красногорская» [4].

В ДНР подразделениями ГВГСС приняты на вооружение азотные станции АМГП-15/07 СУ1, предназначенные для получения газообразного азота из воздуха с параметрами:

- производительность по азоту 15 м³/мин (900 м³/ч);
- объемная доля азота на выходе из станции 95 %;
- давление азота на выходе из станции 0,8 МПа.

Однако опыт применения газоразделительных установок при ликвидации аварий на шахтах им. А.Ф. Засядько, им. Ф.Э. Дзержинского показал, что добиться эффективного подавления очагов горения с их помощью удастся не всегда [7, 8].

Дело в том, что в полученном из мембранной установки азоте содержится до 5 % кислорода, кроме того, из изолированного объема происходят утечки азота через перемычки, соединения перемычки с поверхностью выработки, трещины во вмещающих выработку породах.

За счет этого объемная доля О₂ в изолированном перемычками пространстве может возрасти до 10 % и более. Для подавления тлеющего горения объемная доля кислорода в газовой смеси не должна превышать 1...2 %.

Кроме того, для определения реальной интенсивности и времени подачи газообразного азота в изолированный участок необходимо учитывать поглощение азота и его утечки, а также выделение горючих газов очагом горения.

Анализ последних публикаций. Оработкой и внедрением средств борьбы с подземными пожарами с помощью газообразного азота занимались такие специалисты горноспасательного дела, как В.Г. Игишев, В.М. Портола, О.Э. Толкачев, Ю.Ф. Булгаков и др. [1 – 5].

Цель статьи – определение параметров заполнения изолированного пространства аварийной горной выработки азотом, расчет интенсивности и времени подачи газообразного азота при ликвидации очагов горения.

Изложение основного материала. При заполнении азотом (или другим инертным газом) небольших изолированных объёмов ($V \leq 300 \text{ м}^3$), к которым можно отнести короткие тупиковые выработки, камеры, выработанные пространства и другие подземные объекты, происходит интенсивное перемешивание газовой смеси, которое в первом приближении можно считать полным и протекающим мгновенно [6].

Заполняемый объём необходимо предварительно изолировать перемычками, чтобы уменьшить утечки инертного газа (см. рисунок).

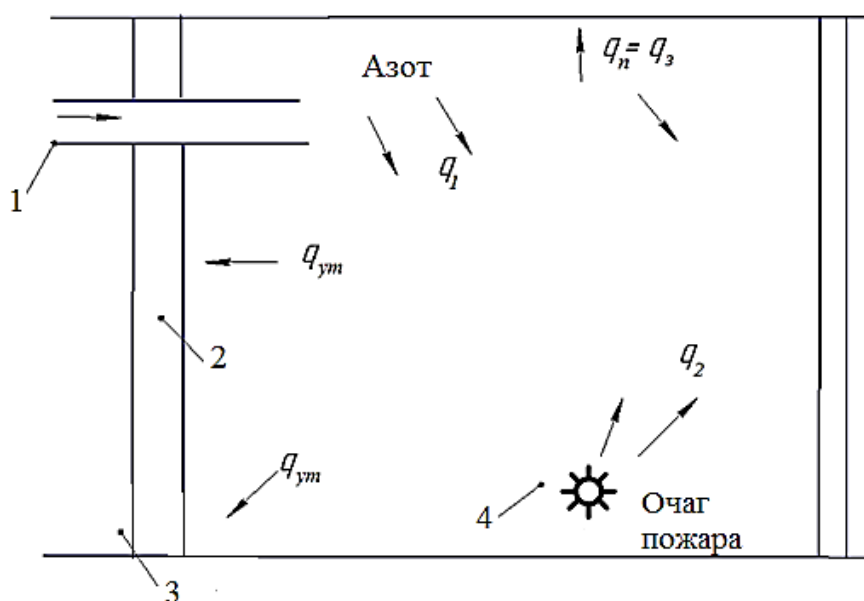


Схема воздушно-газовых потоков в изолированном объеме горной выработки:

- 1 – трубопровод для подачи азота; 2 – камера выравнивания давления;
3 – неплотное прилегание перемычек; 4 – очаг пожара

Азот из установки мембранного разделения поступает по трубопроводу в изолированный объем горной выработки и на очаг пожара.

При заполнении азотом изолированного объема происходит его поглощение на поверхности выработки, которое сопоставимо с расходом подаваемого газа и поэтому требует учета.

Тогда дифференциальное уравнение изменения концентрации азота $C_{\text{аз}}$, $\text{м}^3/\text{с}$, во времени будет иметь вид

$$V \frac{dC_{\text{аз}}}{dt} = q_1 - q_3 - q_{\text{ут}} C_{\text{аз}}, \quad (1)$$

при начальном условии $C_{\text{аз}} = 0,79 \text{ м}^3/\text{с}$ и $t = t_0$,

где q_1 – интенсивность подачи азота в изолированный участок, $\text{м}^3/\text{с}$;

q_3 – интенсивность поглощения азота поверхностью изолированного объема, $\text{м}^3/\text{с}$;

$q_{\text{ут}}$ – интенсивность утечек азота из изолированного объема, м³/с.
Интенсивность поглощения

$$q_3 = k_{\text{п}} C_{\text{аз}}, \quad (2)$$

где q_3 – коэффициент пропорциональности, численно равный интенсивности поглощения азота при $C_{\text{аз}} = 1$ м³/с.

Утечки возникают из-за перепада давления ΔP , Па, по обе стороны перемычек, и их интенсивность может быть определена по формуле

$$q_{\text{ут}} = kS\Delta P, \quad (3)$$

где k – коэффициент газопроницаемости перемычки площадью 1 м², м/(с·Па);

S – площадь перемычки, м²;

ΔP – перепад давления на перемычках, Па.

Изменение давления P , Па, происходит за счет нагнетания инертного газа и образования горючих газов в изолированном объеме:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{RT_0}{Vg} (\gamma_1 q_1 + \gamma_2 q_2 - \gamma_{\text{ср}} q_{\text{ут}}), \quad (4)$$

где T_0 – абсолютная температура газовой смеси, К;

R – газовая постоянная, м²/(с²·К);

γ_1, γ_2 – плотность азота и горючих газов, соответственно, кг/м³;

$\gamma_{\text{ср}}$ – средняя плотность газовой смеси, кг/м³;

q_2 – интенсивность образования и выделения горючих газов, м³/с;

g – ускорение силы тяжести ($g = 9,81$ м/с²).

Дифференцируем выражение (3) по времени и, исключая из (4) $\frac{dp}{dt}$, получим

$$\frac{dq_{\text{ут}}}{dt} + \frac{\gamma_{\text{ср}} k S R T_0}{Vg} q_{\text{ут}} = \frac{k S R T_0}{Vg} (\gamma_1 q_1 + \gamma_2 q_2). \quad (5)$$

Это уравнение описывает изменение интенсивности утечек во времени.

Интегрируя выражение (5) по промежутку времени от t_0 до t , получаем

$$q_{\text{ут}} = \frac{\gamma_1 q_1 + \gamma_2 q_2}{\gamma_{\text{ср}}} \left[1 - \exp \left(- \frac{k S R T_0 \gamma_{\text{ср}}}{Vg} (t - t_0) \right) \right]. \quad (6)$$

Подставим в уравнение (1) зависимости (2) и (6) и после интегрирования будем иметь

$$C_{\text{аз}} = \left(C_{\text{аз}}^{(0)} + A_1 \int_{t_0}^t \tau^{-\beta-1} e^{-\tau} d\tau \right) \exp \{ -A_2(t - t_0) + A_3(e^{-A_4(t-t_0)} - 1) \}, \quad (7)$$

где обозначены:

$$A_1 = \left[\frac{\gamma_1 q_1 + \gamma_2 q_2}{\gamma_{cp} k S R T_0} \right] \frac{\left(q_3 + \frac{\gamma_1 q_1 + \gamma_2 q_2}{\gamma_{cp}} \right) g}{k S R T_0 \gamma_{cp}}; \quad (8)$$

$$A_2 = \frac{q_3}{V} + \frac{\gamma_1 q_1 + \gamma_2 q_2}{\gamma_{cp} V}; \quad (9)$$

$$A_3 = \frac{\gamma_1 q_1 + \gamma_2 q_2}{\gamma_{cp}^2 k S R T_0}; \quad (10)$$

$$A_4 = \frac{k S R T_0 \gamma_{cp}}{V g}; \quad (11)$$

$$\beta = A_2 / A_4; \quad (12)$$

$$\tau = -A_3 e^{-A_4(t-t_0)}; \quad (13)$$

$$\tau_0 = -A_3. \quad (14)$$

Интеграл в выражении (7) можно выразить через вырожденные гипергеометрические функции в виде

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \tau^{-\beta-1} e^{-\tau} d\tau = \frac{\tau_0^{-\beta}}{\beta} e^{-\tau_0} \varphi(1, 1 - \beta \tau_0) - \frac{\tau_0^{-\beta}}{\beta} e^{-\tau} \varphi(1, 1 - \beta \tau). \quad (15)$$

Сами вырожденные гипергеометрические функции выражаются рядами:

$$\varphi(1, 1 - \beta \tau) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \tau^n; \quad (16)$$

$$\varphi(1, 1 - \beta \tau_0) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \tau_0^n, \quad (17)$$

где $a_n = \prod_{(i=1)}^n (i - \beta)^{-1}$, $a_n < 0$. (18)

Таким образом, выражение (7) описывает изменение концентрации азота во времени при его запуске и поглощении в изолированном объеме с учетом влияния перемычек.

$$C_{аз} = \frac{\sum_{i=1}^3 q_i - \sqrt{-a_n}}{2q_3} - \sqrt{-a_n} / [q_3 \left(\frac{\sum_{i=1}^3 q_i - 2q_3 C_{аз} + \sqrt{-a_n}}{\sum_{i=1}^3 q_i - 2q_3 C_{аз} - \sqrt{-a_n}} e^{\frac{\sqrt{-a_n}(t-t_0)}{V}} - 1 \right)]; \quad (19)$$

$$t = t_0 + \frac{V}{\sqrt{-a_n}} \ln \left(\frac{\sum_{i=1}^3 q_i - 2q_3 C_{аз} + \sqrt{-a_n}}{\sum_{i=1}^3 q_i - 2q_3 C_{аз}^{(0)} + \sqrt{-a_n}} \frac{\sum_{i=1}^3 q_i - 2q_3 C_{аз}^{(0)} - \sqrt{-a_n}}{\sum_{i=1}^3 q_i - 2q_3 C_{аз} - \sqrt{-a_n}} \right). \quad (20)$$

Определили время нарастания утечек до максимума из условия

$$\exp\left(\frac{kSR_0Y_{cp}}{vg}\Delta t\right) = 0,01, \quad (21)$$

$$\text{откуда } \Delta t = \frac{4,605 Vg}{kSRT_0Y_{cp}}. \quad (22)$$

При заполнении изолируемого участка горной выработки азотом важно знать не только его распределение во времени, но также и распределение других компонентов газовой смеси горючих газов и кислорода.

Исходное уравнение для изменения концентрации горючих газов имеет вид

$$V \frac{dC_{г.г}}{dt} = q_2 - q_{ут} C_{г.г}, \quad (23)$$

с начальным условием $C_{г.г} = C_{г.г}^0$ при $t = t_0$.

Тогда получим

$$C_{г.г} = \exp\left\{-\frac{1}{V} \int_{t_0}^t q_{ут} dt\right\} \left\{\frac{q_2}{V} \int_{t_0}^t \exp\left[\frac{1}{V} \int_{t_0}^t q_{ут} dt\right] dt + C_{г.г}^0\right\}. \quad (24)$$

Аналогично для кислорода

$$V \frac{dC_{O_2}}{dt} = -q_{ут} C_{O_2} \quad (25)$$

при начальном условии $C_{O_2} = C_{O_2}^0$ и $t = t_0$.

Решение уравнения (25) имеет вид

$$C_{O_2} = C_{O_2}^0 \exp\left\{\left[\frac{q_1 + q_2 - q_3 - \sqrt{-b}}{2V}(t - t_0) + \ln\left(\frac{Ae^{\frac{-\sqrt{-b}(t-t_0)}{V}} - 1}{A - 1}\right)\right]\right\}, \quad (26)$$

$$\text{где } A = \frac{\sum_{i=1}^3 q_i - 2q_3 C_{аз}^{(0)} + \sqrt{-b}}{\sum_{i=1}^3 q_i - 2q_3 C_{аз}^{(0)} - \sqrt{-b}}. \quad (27)$$

После прекращения запуска азота его концентрация в изолированном объеме начинает снижаться.

Возможны два случая: изменение концентрации без выноса с подсосом воздуха, когда $q_n \geq q_2$, и с выносом, когда $q_n < q_2$.

В первом случае имеем

$$\left. \begin{aligned} V \frac{dC_{аз}}{dt} &= -q_n; \\ V \frac{dC_{г.г}}{dt} &= q_3; \\ V \frac{dC_{O_2}}{dt} &= (q_n - q_2) C_{O_2}^{(H)}. \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

При начальных условиях

$$C_{\text{аз}} = C_{\text{аз}}^0; C_{\text{г.г}} = C_{\text{г.г}}^{(1)}; C_{\text{O}_2} = C_{\text{O}_2}^{(1)} \quad (29)$$

решение уравнений (28) имеет вид

$$\left. \begin{aligned} C_{\text{аз}} &= C_{\text{аз}}^{(1)} e^{-\frac{g}{V} q_3 (t-t_1)}; \\ C_{\text{г.г}} &= C_{\text{г.г}}^{(1)} + \frac{q_2}{V} (t - t_1); \\ C_{\text{O}_2} &= C_{\text{O}_2}^{(1)} - \frac{q_2}{V} C_{\text{O}_2}^{(\text{н})} (t - t_1) - C_{\text{O}_2}^{(\text{н})} C_{\text{аз}}^{(1)} \left(e^{-\frac{q_2}{V} (t-t_0)} - 1 \right). \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

Азотную станцию устанавливают на поверхности, вырабатываемый ею газ подают к изолированному участку по трубопроводу. Для подачи азота можно использовать имеющийся на шахте дегазационный трубопровод.

Азот, подаваемый к изолированному пространству, будет обладать не только инертизирующим, но и пожаротушающим эффектом. Азот замещает кислород, снижая интенсивность горения.

Для получения максимального положительного эффекта целесообразно снизить утечки азота из изолированного участка. Величину диаметра трубопровода определяют по требуемому расходу газообразного азота. Максимально допустимое аэродинамическое сопротивление трубопровода определим по формуле

$$R_{\text{а.мп}} = h_{\text{а.с}} / q_{\text{а}}^2, \quad (31)$$

где $R_{\text{а.мп}}$ – аэродинамическое сопротивление трубопровода, Па·с²/м⁶;
 $h_{\text{а.с}}$ – давление (напор) азота на выходе из азотной станции, Па;
 $q_{\text{а}}$ – средний расход азота в трубопроводе, м³/с.

Выводы. Получены зависимости, в которых учтено распределение не только газообразного азота во времени, но и других компонентов газовой смеси горючих газов и кислорода. Кроме того, в расчетах предусмотрено определение изменения концентрации газообразного азота без выноса с подсосом воздуха и с выносом. Результаты работы могут быть использованы при разработке методики расчета параметров подачи азота для тушения подземных пожаров.

Список литературы / References

1. Син, С.А. Повышение эффективности применения азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах / С.А. Син, В.А. Портола, В.Г. Игишев // Уголь. – 2018. – № 5. – С. 51 – 57.

Sin, S.A., Portola, V.A., Igishev, V.G. *Povysheniye effektivnosti primeneniya azota*

dlya bor'by s samovozgoraniyem uglya v shakhtakh [Improvement of effectiveness of nitrogen employment for fighting the coal spontaneous combustion in mines]. *Ugol' – Coal*, 2018, no. 5, pp. 51 – 57.

2. Портола, В.А. Повышение эффективности применения азота для подавления самовозгорания угля / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов // Вестник КузГТУ. – 2011. – № 5. – С. 59 – 63.

Portola, V.A., Galsanov, N.L. *Povysheniye effektivnosti primeneniya azota dlya podavleniya samovozgoraniya uglya* [Effectiveness improvement of nitrogen employment for suppression of the coal spontaneous combustion]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of the KuzGTU]. 2011, no. 5, pp. 59 – 63.

3. Портола, В.А. Оценка эффективности тушения скопления угля различными хладагентами / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 2. – С. 181 – 185.

Portola, V.A., Galsanov, N.L. *Otsenka effektivnosti tusheniya skopleniya uglya razlichnymi khladagentami* [Evaluation of effectiveness of extinguishing the coal accumulation with various cooling agents]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of the KuzGTU]. 2014, no. 2, pp. 181 – 185.

4. Ефимов, В.И. Борьба с подземными пожарами путем инертизации выработанных пространств на шахтах ООО «Объединение „Прокопьевскуголь”» / В.И. Ефимов, Ю.В. Вибе // Известия ТулГУ. Науки о Земле. – 2013. – № 2. – С. 29 – 41.

Yefimov, V.I., Vibe, Yu.V. *Bor'ba s podzemnymi pozharemi putyem inertizatsii vyrabotannykh prostranstv na shakhtakh ООО “Ob’yedineniye “Prokop’yevskugol”* [Fighting the underground fires by inertisation of goafs at ООО "Ob'yedineniye Prokop'yevskugol" mines]. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle – Proceedings of the Tula State University. Earth sciences*, 2013, no. 2, pp. 29 – 41.

5. Син, С.А. Применение азота для борьбы с самовозгоранием угля в шахтах / С.А. Син // Вестник КузГТУ. – 2015. – № 3. – С. 167 – 171.

Sin, S.A. *Primeneniye azota dlya bor'by s samovozgoraniyem uglya v shakhtakh* [Employment of nitrogen for fighting the coal spontaneous combustion in mines]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of the KuzGTU]. 2015, no. 3, pp. 167 – 171.

6. Портола, В.А. Эффективность использования инертных составов для тушения пожаров в выработанном пространстве шахт / В.А. Портола, Н.Л. Галсанов // Вестник КузГТУ. – 2013. – № 6. – С. 80 – 83.

Portola, V.A., Galsanov, N.L. *Effektivnost' ispol'zovaniya inertnykh sostavov dlya tusheniya pozharov v vyrabotannom prostranstve shakht* [Effectiveness of the use of inert compositions for extinguishing the fires in the goaf of mines]. *Vestnik KuzGTU* [Bulletin of the KuzGTU]. 2013, no. 6, pp. 80 – 83.

7. Булгаков, Ю.Ф. Газоразделительные мембранные модули для создания инертной среды в пожарных участках / Ю.Ф. Булгаков, А.В. Толмачева, С.Г. Филимонов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. – Донецк, 2002. – С. 102 – 110.

Bulgakov, Yu.F., Tolmacheva, A.V., Filimonov, S.G. *Gazorazdelitel'nyye membrannyye moduli dlya sozdaniya inertnoy sredy v pozharnykh uchastkakh* [Gas-separation membrane moduli for creation of the inert medium in fire sections]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr.* [Proc. of the NIIGD “Respirator” “Mine-rescue work”]. Donetsk, 2002, pp. 102 – 110.

8. Костенко, В.К. Совершенствование технологии инертизации воздуха в горных выработках / В.К. Костенко, Т.В. Костенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2005. – № S2. – С. 198 – 204.

Kostenko, V.K., Kostenko, T.V. *Sovershenstvovaniye tekhnologii inertizatsii vozdukha v gornykh vyrabotkakh* [Improvement of air inertisation technology in mine workings]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten': nauch.-tekhn. zhurn.* – *Mining information and analytical bulletin: scientific and technical journal*, 2005, no. S2, pp. 198 – 204.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 19.08.2020

Oleg Igorevich Kovrizhkin, commander; e-mail: metro-1973@mail.ru

The State operation Para-military mine-rescue unit of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters
283048, Donetsk, 7, pereulok Nikolenko. Phone (+38 062) 343-52-64

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

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

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

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

FILLING A SEALED AREA OF A MINE WORKING WITH THE GASEOUS NITROGEN

Purpose. Determination of parameters for filling the sealed area of the accident mine working with nitrogen, calculation of intensity and time period of delivering the gaseous nitrogen during elimination of seats of fire.

Methodology. Theoretical investigation of gas-dynamic processes during filling the sealed area with the gaseous nitrogen with allowance for its adsorption and leaks.

Results. The mathematical dependences have been obtained for calculating the rate of gaseous nitrogen delivery into the sealed space of a mine working with allowance for its adsorption by the surface of the mine working, possible leaks through the stoppings and bearing strata clefts, combustible gases being released by the seat of fire.

Scientific novelty. The algorithm has been proposed for calculation of parameters for delivering the nitrogen into the sealed volume taking into account the possible leaks.

Practical value. The dependences have been obtained that permit to determine the parameters of the gaseous nitrogen delivery into the sealed section of an accident mine working.

Keywords: *gaseous nitrogen; mine; stopping; adsorption; seat of fire; intensity; time period of delivery; sealed volume.*

УДК 699.812.3

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

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

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

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

ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНОГО СВЯЗУЮЩЕГО ДЛЯ ОГНЕЗАЩИТЫ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель. Разработка огнезащитных вспучивающихся покрытий на основе минерального связующего для деревянных строительных конструкций.

Методы. Определение коэффициента вспучивания с помощью измерения и соотношения толщины покрытия до и после теплового воздействия. Оценка горючести покрытий методом огневого удара – экстремальное нагревание покрытия в открытом пламени газовой горелки.

Результаты. Из обширной группы органических и минеральных связующих выбрано наиболее дешевое и доступное – жидкое натриевое стекло. В результате исследований установлено оптимальное количество минерального связующего и массовое соотношение компонентов. Разработан рецептурный состав вспучивающихся покрытий для огнезащиты деревянных строительных конструкций, рассмотрены функции основных составляющих покрытий. Предварительные исследования показали, что огнезащитный эффект карбамида и меламина усиливают добавки оксида цинка, гидроксида алюминия и тетрасиликата магния (талька). Для разработанных огнезащитных покрытий определен коэффициент вспучивания, дана оценка горючести в открытом пламени газовой горелки.

Научная новизна. Подобрано оптимальное массовое соотношение минерального связующего, инертных и активных добавок в огнезащитных покрытиях, вспучивающихся при термическом воздействии и обладающих способностью образовывать на защищаемой поверхности твердую прочную корку в виде расплава при температуре не менее 250 °С.

Практическая значимость. Разработанные негорючие вспучивающиеся покрытия позволяют перевести древесину – горючий материал, в категорию трудногорючих и тем самым повысить огнезащитную эффективность деревянных строительных конструкций, что снизит риск быстрого обрушения здания и вытекающих из этого последствий. Компоненты разработанных покрытий нетоксичны, поэтому возможно использование конструкции с огнезащитными покрытиями в жилых помещениях. Разработка вспучивающихся составов позволяет расширить номенклатуру огнезащитных материалов, понизить их стоимость путем замены дорогих и дефицитных компонентов более доступными материалами.

Ключевые слова: *вспучивающееся покрытие; древесина; жидкое натриевое стекло; коэффициент вспучивания; огнезащита; пенококс.*

Постановка проблемы. Древесина относится к наиболее широко применяемым материалам в жилищно-гражданском и сельскохозяйственном строительстве. Широкое использование древесины объясняется экологичностью, доступностью, относительно высокой прочностью, небольшой плотностью, малой теплопроводностью и простой технологией механической обработки материала.

Вместе с тем древесина обладает повышенной пожарной опасностью и склонностью к биологическому разрушению. Для защиты древесины от воздействия огня и негативных биологических факторов разработан ряд способов, среди которых наиболее эффективный – нанесение на поверхность деревянных конструкций специальных покрытий. Такие био- и огнезащитные покрытия должны обладать высокой адгезией к поверхности конструкции, легко наноситься на защищаемую поверхность, не иметь внешних дефектов, не выделять токсичных продуктов и дыма при воздействии высоких температур. Кроме того, покрытие должно переводить древесину в категорию трудногорючих материалов и защищать от гниения, образования микроорганизмов, бактерий, плесени, грибов и т.д. Поэтому эффективная комплексная огне- и биологическая защита деревянных строительных конструкций остается актуальной проблемой.

Анализ последних исследований. Критический анализ публикаций [1 – 4] показал, что получение огнезащитных составов – сложный технологический процесс ввиду многостадийности введения компонентов, необходимости их тщательного перемешивания и разбавления до нужной консистенции для достижения однородности покрытия. Исходные компоненты большинства огнезащитных покрытий отличаются высокой стоимостью, дефицитностью и токсичностью [5]. В связи с этим разработка рецептур экологически безопасных, рентабельных огнезащитных покрытий для деревянных конструкций – перспективное направление исследований.

Цель работы – создание огнезащитных вспучивающихся покрытий на основе минерального связующего для деревянных строительных конструкций.

Изложение основного материала. Разработка огнезащитных вспучивающихся покрытий осуществлялась, исходя из следующего перечня критериев:

- термическая стойкость (устойчивость к мгновенному тепловому удару);
- отсутствие токсичности;
- удовлетворительная адгезия;
- способность обеспечивать быстрый темп отверждения покрытия после нанесения;
- невысокая температура пленкообразования;
- доступность и дешевизна компонентов.

Состав огнезащитных покрытий отвечает общим принципам построения рецептур лакокрасочных материалов: связующее, наполнители, пигменты, реологические ингредиенты, отвердители, если покрытие отверждаемого типа. Правильный качественный и оптимальный количественный подбор компонентов, их индивидуальные свойства и обеспечение совместимости оказывают существенное влияние на общие свойства огнезащитных вспучивающихся покрытий.

Из обширной группы органических и минеральных связующих наиболее доступное и дешевое – жидкое натриевое стекло, представляющее собой водный раствор щелочного силиката натрия $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$. Твердение жидкого

стекла связано с образованием гидросиликатов кремнезема ($m\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$), которые обладают цементирующими свойствами. Однако у образующейся пленки покрытия повышенная хрупкость вследствие низкой механической прочности и недостаточной эластичности. Указанные недостатки исключали введением в состав покрытия пластификаторов. В качестве пластификатора использовали эмаль ПФ-115 белого цвета и латекс СКС-65 ГП. Эмаль ПФ-115 также применяли для повышения стойкости покрытий к воздействию атмосферных условий. При введении пластификатора в жидкое стекло возможна коагуляция с образованием структур, снижающих устойчивость дисперсной системы. Повысить устойчивость дисперсной системы можно за счет введения поверхностно-активных веществ неионогенного типа. Их функция как стабилизаторов заключается в обволакивании частиц коллоидного раствора и образовании слоя, который предотвращает слипание мелких частиц раствора. Для жидкого натриевого стекла – минерального связующего в качестве стабилизатора использовали смесь неорганических веществ: гидроксида натрия (NaOH) и триполифосфата натрия (Na_3PO_4).

Защитный механизм действия покрытий вспучивающегося типа заключается в образовании изолирующего слоя материала за счет выделения негорючих газов при воздействии огня.

Для образования изолирующего вспученного слоя в состав покрытий вводили тетраборат натрия ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), меламин ($\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6$) и карбамид $[(\text{NH}_2)_2\text{CO}]$, при термическом разложении которых выделяются пары воды (H_2O), аммиак (NH_3) и диоксид углерода (CO_2). Тетраборат натрия вводили в состав покрытия как флюс для получения однородного расплава. Кроме того, тетраборат натрия (бура) в составе огнезащитного покрытия дополнительно выполняет функции антипирена и дезинфицирующего средства (антисептика), препятствуя процессам гниения и биологическому разложению древесины.

Массовая доля наносимых композиций составляла 55...80 % связующего (жидкое натриевое стекло) и 20...35 % смеси функциональных добавок: газообразователя, дисперсного и волокнистого антипиренов-наполнителей, пластификатора, стабилизатора и пигмента.

Порошкообразные добавки предварительно подвергали помолу. Смешивали сухие компоненты композиции в фарфоровой ступке в течение 20 мин. Диспергирование компонентов в жидком натриевом стекле производили в стеклянной посуде вручную. Готовую композицию наносили ручным способом (металлическим шпателем) слоем толщиной 0,8...1 мм на стальные пластины размером 2 x 80 x 120 мм и деревянные бруски 10 x 10 x 150 мм. После сушки в естественных условиях и испарения воды определяли толщину покрытия.

Предварительно оценивали и выбирали оптимальные рецептурные составы покрытий по коэффициенту вспучивания $K_{\text{всп}}$, значение которого определяли по формуле

$$K_{\text{всп}} = h_{\text{к}} / h_0,$$

где h_k – высота слоя вспененного кокса, мм;

h_0 – толщина слоя покрытия до испытания, мм.

В лабораторных условиях для оценки горючести огнезащитных покрытий образцы подвергали воздействию открытого пламени газовой горелки на специальной установке. Для этого образец древесины с нанесенным покрытием выдерживали в газовой горелке в течение 2 мин при высоте пламени 23...25 см. За образцом наблюдали во время испытания и осматривали его после извлечения из пламени газовой горелки, при этом фиксировали:

- изменение цвета, скатывание, усадку, вспучивание, коробление, тление;
- появление признаков воспламенения (пламенное горение в зоне и вне зоны воздействия пламени газовой горелки);
- самостоятельное горение (тление) после отключения газовой горелки;
- наличие дыма и горючих газов;
- качество вспучивания и образовавшегося вспененного слоя (кокса).

Это экспрессный метод оценки горючести огнезащитных материалов для древесины и материалов на ее основе.

На основе жидкого натриевого стекла и добавок приготовлены и испытаны пять композиций с различной концентрацией газообразующих агентов, пластификаторов, наполнителей и пигментов. Для исследованных композиций получены следующие значения $K_{всп}$: 10; 12; 40; 14.

Эффективность вспучивания и качество образовавшегося вспененного слоя силикатных покрытий на металлических пластинах показаны на рис. 1.



Рис. 1. Силикатные покрытия на металле после термического воздействия

На рис. 2 приведены примеры образования вспененного кокса силикатных покрытий на деревянных брусках после воздействия пламени газовой горелки.



Рис. 2. Защитный слой силикатных покрытий на древесине после термического воздействия

Применение в составе покрытий пластификатора (вспомогательного связующего) и смеси неорганических стабилизаторов позволило получить вспененный кокс в виде негорючей силикатной пены однородной плотной структуры и тем самым повысить ее механическую и термическую устойчивость в условиях пожара. Введение огнестойких и армирующих минеральных наполнителей (вспученного вермикулита и базальтового волокна) обеспечило отсутствие растрескивания огнезащитных покрытий при естественной сушке.

Выводы. В результате подбора оптимального количества минерального связующего и массового соотношения исходных компонентов разработаны нетоксичные огнезащитные покрытия вспучивающегося типа для деревянных конструкций на основе доступного и дешевого материала – жидкого натриевого стекла. Исследования показали, что огнезащитный эффект карбамида и меламина усиливают добавки оксида цинка, гидроксида алюминия и тетрасиликата магния (тальк).

Список литературы / References

1. Горовых, О.Г. Механизмы процессов, реализующихся при защите древесины огнезащитными составами / О.Г. Горовых // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2017. – № 1(41). – С. 47 – 57.

Gorovykh, O.G. *Mekhanizmy protsessov, realizuyushchikhsya pri zashchite drevesiny ognезashchitnymi sostavami* [Mechanisms of processes proceeding during coating the wood materials with fire-retardant compositions]. *Chrezvychnyye situatsii: predurprezhdeniye i likvidatsiya – Emergencies: prevention and elimination*, 2017, no. 1(41), pp. 47 – 57.

2. Огнезащитное покрытие для снижения горючести древесины / А.С. Беликов, Г.Г. Капленко, Е.Н. Корж, Е.В. Дзедина, Л.Д. Устимович // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. Серия: Безопасность жизнедеятельности. – 2016. – Вып. 93. – С. 221 – 227. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmbz_2016_93_35.

Belikov, A.S., Kaplenko, G.G., Korzh, Ye.N., Dzetsina, Ye.V., Ustimovich, L.D. *Ognезashchitnoye pokrytiye dlya snizheniya goryuchesti drevesiny* [Fire-retardant coating for reducing the wood combustibility]. *Stroitel'stvo. Materialovedeniye. Mashinostroyeniye. Seriya: Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti – Building. Materials science. Mechanical engineering. Series: Life safety*, 2016, issue 93, pp. 221 – 227. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/smmbz_2016_93_35.

3. Терморасширяющиеся полимерные композиционные материалы / Р.В. Кропачев, В.В. Новокшенов, С.И. Вольфсон, С.Н. Михайлов // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 5. – С. 60 – 63.

Kropachev, R.V., Novokshonov, V.V., Vol'fson, S.I., Mikhaylov, S.N. *Termorasshiryayushchiyesya polimernyye kompozitsionnyye materialy* [Intumescent polymeric composition materials]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta – Bulletin of the Technological University*, 2015, vol. 18, no. 5, pp. 60 – 63.

4. Применение синтетических латексов для получения пленок на основе бумаги / В.И. Азаров, В.А. Винославский, А.Н. Зарубина, И.В. Любавина // Лесной вестник. – 2016. – № 3. – С. 10 – 14.

Azarov, V.I., Vinoslavskiy, V.A., Zarubina, A.N., Lyubavina, I.V. *Primeneniye sinteticheskikh lateksov dlya polucheniya plynok na osnove bumagi* [Application of synthetic latexes for production of films on the basis of paper]. *Lesnoy vestnik – Forest bulletin*, 2016, no. 3, pp. 10 – 14.

5. Еремина, Т.Ю. Особенности и принципы построения рецептур огнезащитных вспучивающихся композиций на основе эпоксидных смол / Т.Ю. Еремина, М.В. Гравит, Ю.Н. Дмитриева // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 7. – С. 52 – 56.

Yeryomina, T.Yu., Gravit, M.V., Dmitriyeva, Yu.N. *Osobennosti i printsipy postroyeniya retseptur ognезashchitnykh vspuchivayushchikhsya kompozitsiy na osnove epoksidnykh smol* [Peculiarities and principles of formulation construction of fire-retardant intumescent compositions based on epoxy resins]. *Pozharovzryvobesopasnost' – Fire and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 7, pp. 52 – 56.

Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;

Viktoria Valentinovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru;

Igor Nikolayevich Nepochatykh, scientific associate; e-mail: tamdoka@mail.ru

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

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

COATINGS BASED ON A MINERAL BINDER FOR FIRE RETARDATION OF WOODEN CONSTRUCTIONS

Purpose. Development of fire-retardant intumescent coatings based on the mineral binder for wooden building structures.

Methodology. Determination of an intumescent index by means of measurement and of correlation of the coating thickness before and after thermal action. Evaluation of coatings combustibility by the fire stroke method, i.e. extreme heating the coating in an open flame of a gas burner.

Results. Out of the large group of organic and mineral binders the most inexpensive and affordable one has been selected, i.e. liquid sodium glass. As follows from the investigations the optimum mineral binder and the mass ratio of components have been determined. The composition formula of the intumescent coatings for fire retardation of the wooden building structures has been developed, the functions of the basic component coatings have been considered. The preliminary investigations have shown that the additions of zinc oxide, aluminium hydroxide and magnesium tetrasilicate (talc) intensify the flame-retardant effect of urea and melamine. The intumescent coefficient has been determined for the developed fire-retardant coatings, the assessment of combustibility in open flame of the gas burner has been given.

Scientific novelty. The optimum mass ratio of the mineral binder, inert and active additions has been selected for the fire-retardant coatings blowing during the thermal action and possessing a capacity to form a solid strong crust in the shape of a melt on a protected surface at a temperature of no less than 250 °C.

Practical value. The developed non-combustible intumescent coatings permit to transfer wood, i.e. the combustible material, to the category of the slow-burning ones and to improve the fire-retardant efficiency of the wooden building structures thereby reducing the risk of rapid collapse of a building and the following consequences. The components of the developed coatings are not toxic hence the use of a construction with the fire-retardant coatings is allowed in living spaces. The development of the intumescent compositions enables expansion of the nomenclature of the fire-retardant materials, reducing their cost by replacement of the expensive and deficit components by more accessible materials.

Keywords: *intumescent coating; wood; liquid sodium glass; intumescent coefficient; fire retardation; foamed coke.*

УДК 622.822.22:614.844.5*Дмитрий Иванович Момот, науч. сотр.; e-mail: ober.niigd@list.ru;**Сергей Андреевич Полунин, ведущий инж.-конструктор; e-mail: sergej.polunin.2013@mail.ru;**Антон Витальевич Еремин, инж.-конструктор I кат.; e-mail: a.v.eremin18@gmail.com**Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-82*

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВЫСОКОНАПОРНОГО ТРУБНОГО ПЕНОГЕНЕРАТОРА

Цель. Исследование возможности усовершенствования высоконапорного трубного пеногенератора ПВТ для получения газомеханической пены средней кратности.

Методика. Аналитические исследования и компьютерное моделирование устройства для получения газомеханической пены, схемные и конструктивные решения проблемы разработки устройства.

Результаты. Определены технические параметры и конструкция устройства для получения газомеханической пены. Учтены достоинства и недостатки выбранных схем компоновки оборудования для получения и подачи газомеханической пены, и проанализирована его работа.

Научная новизна. Впервые применен регулятор расхода воды, обеспечивающий заданный ее расход и не зависящий от давления в пожарном трубопроводе. Также отсутствует необходимость в приготовлении и принудительной подаче раствора пенообразователя на пеногенератор, так как пенообразователь поступает в пеносмеситель за счет эжекции, используя энергию воды пожарного трубопровода.

Практическая значимость. Возможность заранее установить требуемую кратность генерируемой газомеханической пены посредством настройки регулятора расхода воды, подача раствора пенообразователя на сетки за счет энергии воды без использования электроэнергии, что обеспечивает дополнительную безопасность при ликвидации аварий в шахтных условиях.

Ключевые слова: *пеногенератор; регулятор расхода воды; пеносмеситель; газомеханическая пена; раствор пенообразователя; пеногенерирующая сетка; кратность пены.*

Постановка проблемы. Для предупреждения и тушения эндогенных пожаров в угольных шахтах применяют газомеханическую пену [1]. Как правило, такие пожары возникают в труднодоступных местах (выработанном пространстве добычных и подготовительных забоев, целиках, куполах, образовавшихся после обрушения пород, и т.д.).

Газомеханическая пена средней и высокой кратности эффективна при тушении в обрушенных породах и пустотах, занимая свободный объем и охлаждая породу водой, содержащейся в пене. Пенообразователь обволакивает частицы угля и породы пленкой, тем самым препятствуя доступу к ним кислорода и предотвращая самовозгорание.

Подают газомеханическую пену по трубопроводам или скважинам диаметром 75...100 мм, а ее генерирование и подача под давлением осуществляются при помощи сеточных пеногенераторных установок и устройств, в которых образование пены происходит при набрызгивании на сетку раствора пенообразователя и одновременном продувании газа. Для исключения недостатков,

присущих сеточным пеногенераторам, была разработана принципиально новая конструкция, в которой подача раствора пенообразователя и газа на сетку осуществлялась с противоположных сторон [2]. Площадь пеногенирующей сетки увеличена за счет ее конусной формы, применена форсунка, позволяющая осуществлять орошение всей площади сетки. Рациональное размещение сеток и форсунок сводит к минимуму потери раствора пенообразователя при генерировании пены. Для приготовления раствора пенообразователя допускалось использование воды, содержащей механические примеси, что не влияло на работоспособность ПВТ [3].

Подключение пеногенераторных установок к трубопроводам осуществляли через фланцевые соединения, что обуславливало трудоемкость и требовало временных затрат. Тем более, не всегда можно использовать противопожарный трубопровод, закольцованный и находящийся под давлением. Для подачи пены прокладывались отдельные линии, что требовало временных затрат и было недопустимо в аварийной ситуации. Также не всегда при ликвидации аварий возможно использование электроэнергии, необходимой для подачи раствора пенообразователя на пеногенератор.

Анализ последних исследований. При разработке сеточных пеногенераторных установок и устройств необходимо соблюдение ряда условий для устойчивого получения газомеханической пены. К основным из них относятся: минимальная и максимальная скорость воздушного потока, диаметр капель раствора пенообразователя, размер ячейки пеногенирующей сетки, физическая характеристика пузырька пены и т.д. [4, 5]. Однако немаловажное условие – постоянство расхода воды и пенообразователя, влияющие на общую концентрацию раствора. Обеспечение этого условия в аварийной ситуации играет немаловажную роль при получении газомеханической пены необходимой кратности.

Цель работы – исследование возможности усовершенствования высоконапорного трубного пеногенератора ПВТ для получения газомеханической пены средней кратности.

Результаты исследований. Для получения и подачи под давлением газомеханической пены по трубопроводам и пожарным рукавам с условным проходом DN 80 найдены решения компоновки оборудования, обеспечивающие подачу на пеногенератор раствора пенообразователя и газа. Для этого предложено использование воды из шахтного противопожарного трубопровода, сжатого воздуха из шахтной пневмосети или компрессорной установки, емкости с пенообразователем, регулятора расхода воды, пеносмесителя и пеногенератора. Рассмотрены несколько вариантов компоновки оборудования для получения и подачи газомеханической пены.

Воду из шахтного противопожарного трубопровода подают на регулятор расхода (рис. 1,а). Регулятор расхода настраивают на определенный объем жидкости, проходящий через него в единицу времени и не зависящий

от давления в противопожарном трубопроводе и трубопроводе подачи газомеханической пены. Для ограничения засорения сеток содержащимися в воде механическими примесями перед регулятором расхода устанавливают фильтр. Затем вода поступает на пеносмеситель. За счет эффекта эжекции пенообразователь поступает в пеносмеситель, в котором устанавливают необходимую концентрацию пенообразователя в растворе. Затем уже готовый водный раствор пенообразователя попадает в пеногенератор ПГ.

Одновременно в пеногенератор от пневмосети или от компрессорной установки поступает сжатый воздух. В пеногенераторе на пенообразующих сетках происходит процесс генерирования воздушно-механической пены, которая далее может быть подана под давлением по трубопроводу или напорным рукавам к месту ликвидации аварии.

Расход подаваемого водного раствора пенообразователя регулируют задвижкой (рис. 1,б), так как регулятор расхода воды в этой схеме отсутствует. Так же, как показано в предыдущей схеме, в пеногенератор поступает сжатый воздух. Генерируемая в пеногенераторе воздушно-механическая пена поступает под давлением по трубопроводу к месту ликвидации аварии.

На схеме (рис. 1,в) предусмотрена подача заранее приготовленного водного раствора пенообразователя из отдельной емкости, если невозможно по каким-либо причинам использовать шахтный противопожарный трубопровод, например при недостаточном давлении или расходе воды в нем. Пеносмеситель в такой компоновке оборудования отсутствует из-за заранее заданной концентрации водного раствора пенообразователя.

Из емкости водный раствор пенообразователя насосом подают в регулятор расхода. Так как производительность насоса может быть выше заданной, излишки водного раствора пенообразователя по обратной линии поступают в емкость. Так же, как и на вышеприведенных компоновочных схемах, перед насосом устанавливают фильтр для исключения засорения системы подачи водного раствора пенообразователя и бесперебойной работы регулятора расхода. Водный раствор пенообразователя и сжатый воздух одновременно подают в пеногенератор. Генерируемую в пеногенераторе воздушно-механическую пену далее можно подавать под давлением в трубопровод.

Контроль за давлением и расходом в трубопроводах подачи воды и воздуха, а также в пеногенераторе осуществляется с помощью манометров и, при необходимости, расходомеров (на схемах не приведены).

В результате проведенного анализа предлагаемых компоновочных схем установлено, что:

- применение регулятора расхода воды позволяет стабилизировать ее подачу на пеногенератор, независимо от расхода противопожарного трубопровода, для приготовления водного раствора пенообразователя;
- приготовление раствора пенообразователя осуществляется в пеносмесителе, концентрацию раствора регулирует дозатор;

- отсутствие необходимости использования отдельной емкости для приготовления раствора пенообразователя и электроэнергии для его подачи на пеногенератор;
- нет необходимости в использовании расходомера.

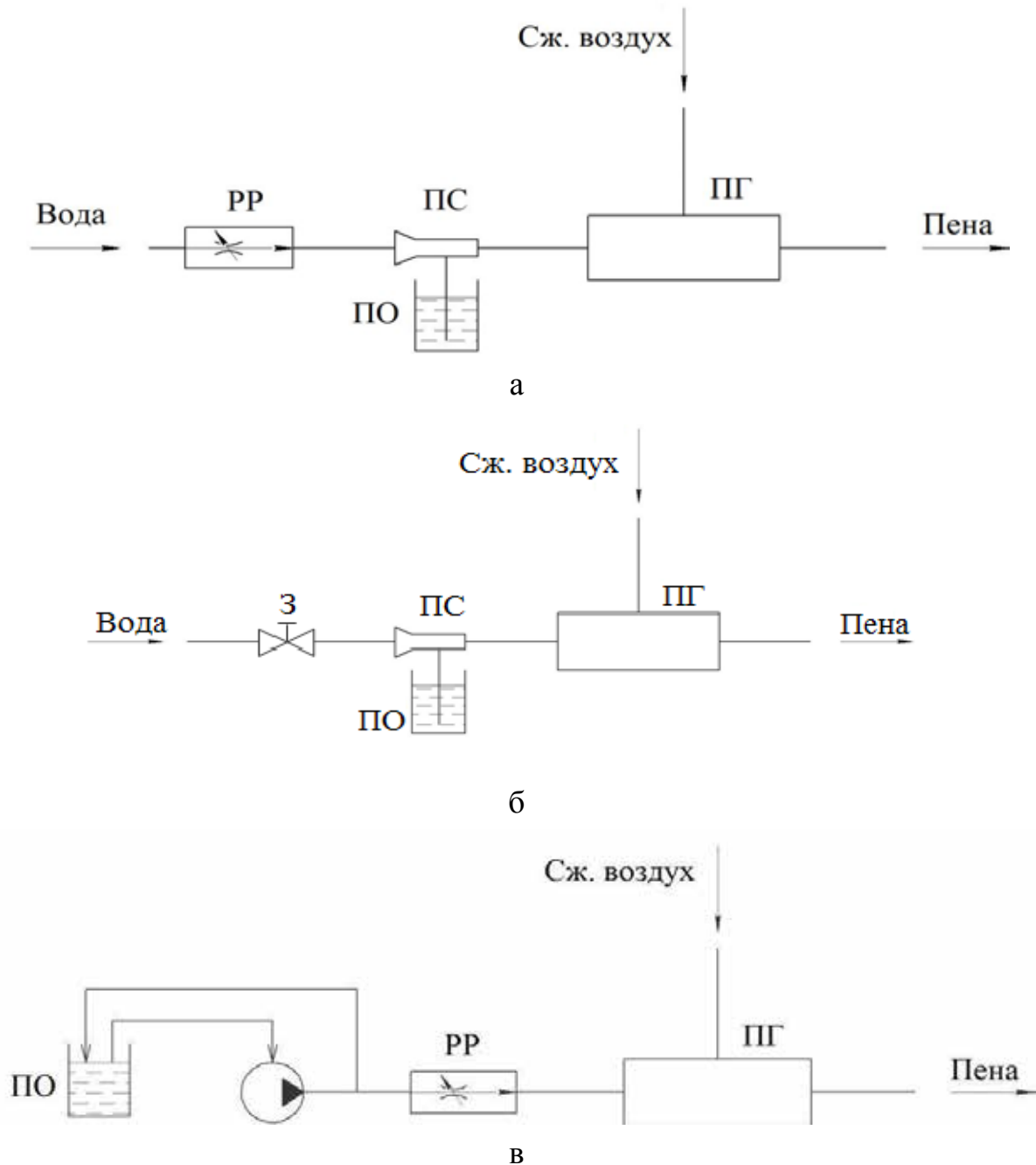


Рис. 1. Компонировка оборудования для получения и подачи газомеханической пены с применением:

- а – регулятора расхода воды и пеносмесителя; б – пеносмесителя;
 в – насоса и регулятора расхода воды; ПО – пенообразователь; ПС – пеносмеситель;
 РР – регулятор расхода; ПГ – пеногенератор; З – задвижка

Исходя из вышеизложенного наиболее рациональна схема компоновки оборудования, приведенная на рис. 1,а.

При разработке высоконапорного трубного усовершенствованного пеногенератора проведено компьютерное моделирование потерь давления воды. Для идеальной движущейся жидкости сумма трех напоров (высот): геометрического, пьезометрического и скоростного – величина постоянная.

Процесс транспортирования жидкости можно описать уравнением Бернулли:

$$Z_1 \rho g + P + \frac{\vartheta_1^2 \gamma}{2} + \sum_1^n \mu \frac{\vartheta_i^2 \gamma_i}{2} = Z_2 \rho g + \frac{\vartheta_2^2 \gamma}{2}, \quad (1)$$

где Z_1, Z_2 – геометрический напор, м;

ρ – плотность жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

P – манометрическое давление в шахтном пожарном трубопроводе, Па;

ϑ_1 – скорость движения жидкости на входе в пеногенератор, м/с;

ϑ_i – скорость движения воды на i -м участке трубопровода, м/с;

μ – коэффициент гидравлических потерь;

γ – удельный вес раствора пенообразователя, Н/м³;

$\sum_1^n \mu \frac{\vartheta_i^2 \gamma_i}{2}$ – суммарные потери давления, Па.

При этом учитывали, что манометрическое давление в шахтном пожарном трубопроводе – от 0 до $4 \cdot 10^5$ Па. Вышеприведенные исследования использованы при разработке усовершенствованной конструкции ПВТ. Особое внимание уделено компьютерному моделированию пеносмесителя, регулятора расхода воды, форсунки пеногенератора с учетом их технических характеристик.

Пеносмеситель (рис. 2) представляет собой эжектор, рабочая и эжектируемая среда которого – капельная жидкость.

Исходными данными (табл. 1) для моделирования конструкции пеносмесителя становятся полное давление на входе пеносмесителя, статическое давление на выходе пеносмесителя и статическое давление среды, откуда осуществляется эжектирование. Кроме того, задается тип рабочей и эжектируемой среды (для упрощения расчета в обоих случаях принимается вода при температуре 25 °С). Оценивают геометрические характеристики по значению расхода рабочей и эжектируемой жидкости.

Таблица 1

Исходные данные для расчета параметров пеносмесителя

Давление на входе, МПа	Давление на выходе, МПа	Давление на всасе, МПа	Рабочая среда	Эжектируемая среда
0,7*	0...0,5*	0*	Вода, при +25 °С	Вода, при +25 °С

* Здесь и далее приведены относительные значения давления

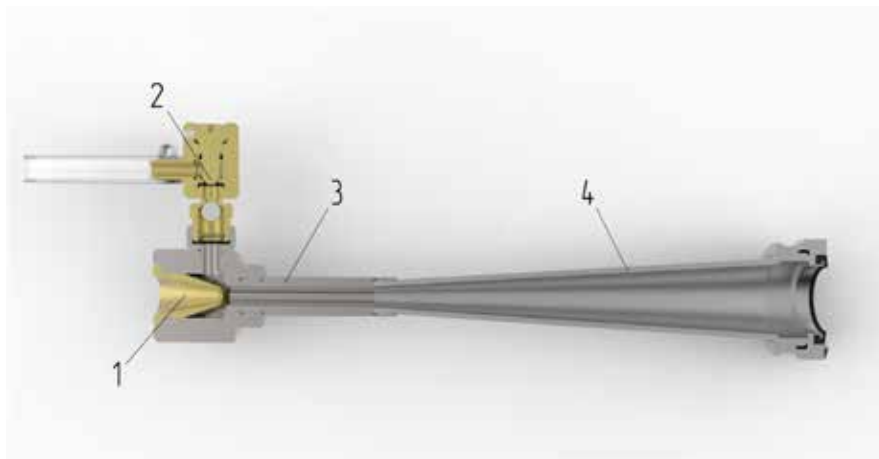


Рис. 2. Общий вид пеносмесителя в разрезе:

1 – форсунка; 2 – дозатор; 3 – камера смешивания; 4 – диффузор

По результатам моделирования установлено, что расход рабочей жидкости должен быть $(2,5 \pm 1)$ л/с. При этом расход эжектируемой жидкости должен обеспечивать массовую долю пенообразователя в растворе с учетом необходимого гарантирования функционирования пеносмесителя, от 3 до 6 % при давлении воды на выходе до 0,5 МПа.

В ходе компьютерного моделирования определены основные оптимальные характеристики пеносмесителя (табл. 2), отвечающие заданным требованиям.

Таблица 2

Оптимальные характеристики пеносмесителя

Параметр	Значение
Диаметр форсунки, мм	10
Диаметр камеры смешивания, мм	12
Длина камеры смешивания, мм	100
Угол конуса диффузора, ... °	7
Длина пеносмесителя, мм	420*

* Длина уточнена на этапе конструирования

Расчетом установлен диапазон давления на выходе пеносмесителя, при котором осуществляется устойчивая эжекция, равный 0...0,45 МПа.

Максимальное расчетное значение разрежения в пеносмесителе 98 кПа, а максимальное расчетное значение расхода эжектируемой среды 0,38 л/с. Для уменьшения данного значения, а также его корректирования с учетом характеристик пенообразователя дозирующее сечение на всасывающем трубопроводе необходимо экспериментально подбирать, изменяя дросселирующий зазор перемещением конусного штока.

Исходные данные для моделирования регулятора расхода воды (рис. 3, табл. 3) – перепад ее давления на входе и выходе. Оценка геометрических

характеристик осуществляется по значению расхода воды, который должен оставаться постоянным при перепаде давления.

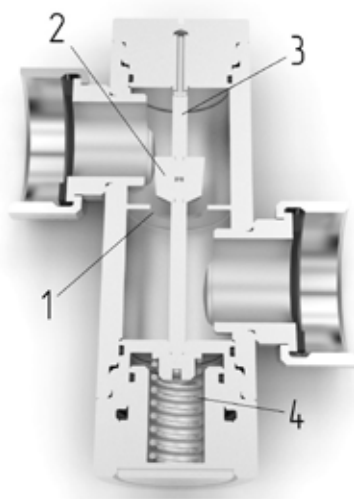


Рис. 3. Общий вид регулятора расхода воды в разрезе:
1 – дозирующее отверстие; 2 – клапан; 3 – шток; 4 – пружина

Таблица 3

Исходные данные для моделирования регулятора расхода воды

Наименование	Значение
Диапазон перепада давления на входе и выходе, МПа	0,05...0,5
Рабочая жидкость	Вода, при +25 °С

Расход воды (2,5±1) л/с.

В процессе компьютерного моделирования определена характеристика пружины, обеспечивающая функционирование регулятора (табл. 4).

Таблица 4

Оптимальные характеристики регулятора расхода воды

Параметр	Значение
Диаметр дросселирующего отверстия, мм	22
Максимальный диаметр клапана, мм	20
Угол конуса клапана, ... °	8,4
Длина клапана, мм	20
Диаметр штока, мм	6

Моделируемый расход воды при установленном диапазоне перепада давления на входе и выходе 1,8...2,6 л/с.

В отличие от кольцевой форсунки, используемой в ПВТ, в разрабатываемом опытном образце применена многосопловая форсунка (рис. 4). При компьютерном моделировании непосредственно пеногенератора главная

задача – определение необходимого сечения его форсунки для снижения потерь давления на ней. Следовательно, исходные данные для моделирования – допустимое значение потери давления на форсунке, которое принято 0,05 МПа (табл. 5).

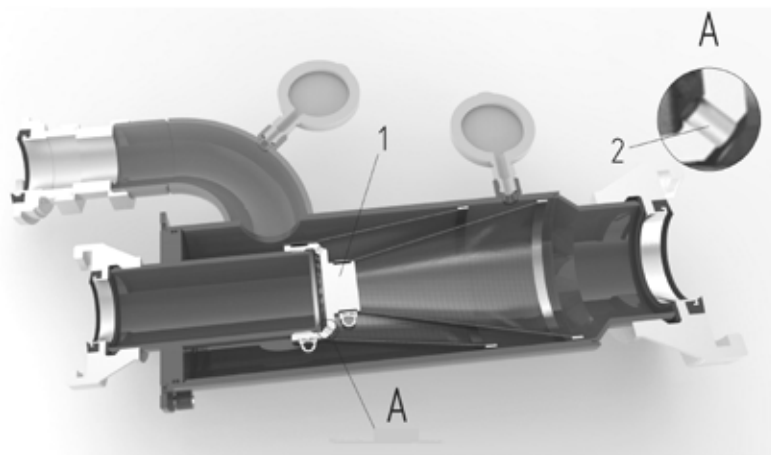


Рис. 4. Общий вид пеногенератора:
1 – форсунка; 2 – сопло

Таблица 5

Оптимальные характеристики форсунки пеногенератора

Характеристика	Значение
Диаметр отверстий, мм	4
Количество отверстий	24

Результаты компьютерного моделирования подтверждены предварительными испытаниями опытного образца ПВТ-У (рис. 5).

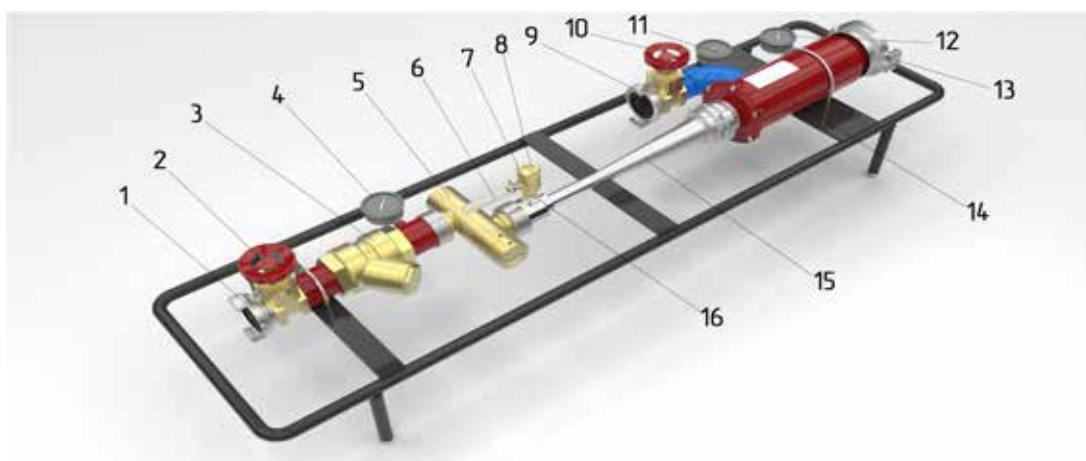


Рис. 5. Общий вид ПВТ-У:

1 – головка напорная для подачи воды; 2, 10 – задвижки; 3 – фильтр; 4, 11, 12 – манометры; 5 – регулятор расхода воды; 6 – трубка подачи пенообразователя; 7 – дозатор; 8 – шток; 9 – напорная головка для подачи сжатого воздуха; 13 – напорная головка для подачи газомеханической пены; 14 – пеногенератор; 15 – пеносмеситель; 16 – обратный клапан

Отличительные особенности ПВТ-У:

- наличие регулятора расхода воды, позволяющего подавать постоянный объем воды, независимо от давления в пожарном трубопроводе и трубопроводе подачи газомеханической пены;
- наличие пеносмесителя, в котором происходит получение раствора пенообразователя, подаваемого непосредственно на пеногенерирующие сетки;
- использование дозатора для получения требуемой концентрации раствора пенообразователя;
- удобство транспортирования, установки и подключения к пожарному трубопроводу и пневмосети.

Выводы

В соответствии с поставленными задачами:

- выполнены аналитические исследования и определена оптимальная компоновочная схема оборудования усовершенствованного ПВТ-У;
- определена возможность работы ПВТ-У без использования электроэнергии в аварийной ситуации;
- сведены к минимуму трудозатраты и оборудование при выполнении работ по ликвидации аварии.

Список литературы / References

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

Pashkovskiy, P.S. *Endogennyye pozhary v ugol'nykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ. (Donetsk branch), 2013, 791 p.

2. Момот, Д.И. Моделирование процесса получения газомеханической пены на сетках // Материалы X Международной конференции: сб. науч. тр. / ПГУ. – Тирасполь, 2017. – С. 149 – 152.

Momot, D.I. *Modelirovaniye protsessa polucheniya gazomekhanicheskoy peny na setkakh* [Modeling of a process of generating the gas-mechanical foam on nets]. *Materialy X Mezhdunarodnoy konferentsii: sb. nauch. tr. / PGU* [Materials of the 10th International conference: collection of scientific works / PGU]. Tiraspol', 2017, pp. 149 – 152.

3. Пат. 61615 Україна, МПК⁷ А62 С 5/02, Е21 F 5/02. Пристрій для одержання газомеханічної піни / Е.О. Попов, П.С. Пашковський, Д.І. Момот; заявл. і патентовл. НДІГС «Респіратор». – № 2003032316; заявл. 18.03.2003; опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9.

Popov, E.O., Pashkovs'kyi, P.S., Momot, D.I. *Prystrii dlia oderzhannia hazomekhanichnoi piny* [Device for gas-mechanical foam generation]. Patent UA, no. 2003032316, 2003.

4. Пашковский, П.С. Особенности процесса пенообразования в генераторах с принудительной подачей воздуха // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 1(53). – С. 58 – 64.

Pashkovskiy, P.S. *Osobennosti protsessa penoobrazovaniya v generatorakh s prinuditel'noy podachey vozdukh* [Peculiarities of foam generation process in forced air feed foam generators]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 58 – 64.

5. Пашковский, П.С. Температурные условия устойчивого пенообразования на сетках // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – № 3(55). – С. 19 – 27.

Pashkovskiy, P.S. *Temperaturnyye usloviya ustoychivogo penoobrazovaniya na setkakh* [Thermal conditions of stable foam generation on nets]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2018, no. 3(55), pp. 19 – 27.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 07.08.2020

Dmitry Ivanovich Momot, scientific associate; e-mail: obep.niigd@list.ru;

Sergey Andreyevich Polunin, leading design engineer; e-mail: sergei.polunin.2013@mail.ru;

Anton Vitalyevich Yeryomin, design engineer of the 1st category; e-mail: a.v.eremin18@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) 332-78-82

IMPROVED HIGH-PRESSURE PIPE FOAM GENERATOR

Purpose. Investigation of a possibility to improve the PIBT high-pressure pipe foam generator for production of the medium-expansion gas-mechanical foam.

Methodology. Analytical investigations and computer simulation of a device for generating the gas-mechanical foam; circuit and constructive solutions to the problem of the device development.

Results. The technical parameters and the construction of the device for gas-mechanical foam generation have been determined. The advantages and disadvantages of the selected equipment configuration circuits for generation and delivery of the gas-mechanical foam have been accounted for, and its operation has been analyzed.

Scientific novelty. For the first time the water-flow control device has been applied that secures its preset consumption and is pressure-independent from the fire water pipeline. Also there is no necessity in preparation and forced feed of a foam agent solution to the foam generator as the foam agent enters the foam mixing chamber due to the ejection using the energy of fire pipeline water.

Practical value. Possibility of presetting the required expansion ratio of the generated gas-mechanical foam by adjusting the water flow control device. To feed the foam agent solution on the nets using the water energy instead of the electric power ensuring the additional safety during the elimination of accidents in mine conditions.

Keywords: foam generator; water flow control device; foam mixing chamber; gas-mechanical foam; foam agent solution; foam generating net; foam expansion ratio.

УДК 614.841.3:543.632.2.07

Валерий Васильевич Шаповалов, д-р хим. наук, завкафедрой; e-mail: wwshapovalov@gmail.com; тел.: (+38 062) 301-03-87;

Алина Анатольевна Берестовая, ст. преподаватель; e-mail: berestova865@gmail.com
Государственное образовательное учреждение высшего и профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»
283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-09

Владислав Вячеславович Шлома, инж. I кат.; e-mail: ilsin1995@gmail.com
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-51

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Разработка инструментальной методики определения термической устойчивости органических горючих материалов.

Методика. Основана на разработанной компьютеризированной установке определения термической устойчивости горючих материалов при изменении их температуры путем непрерывного измерения газообразных продуктов деструкции.

Результаты. Разработана экспериментальная установка пиролиза органических горючих веществ. Основная часть установки – термический блок для нагревания образцов, управляемый с помощью компьютерной программы. Высокая вариативность программы позволяет исследовать термическую устойчивость материалов в широком диапазоне временных и термических параметров. Предусмотрена возможность подключения до восьми датчиков продуктов термической деструкции материалов. Данные измерения формируют в цифровой файл, что облегчает дальнейший анализ и обработку результатов измерений.

Научная новизна. Методика позволяет в динамическом режиме и различных температурных условиях получать информацию о продуктах и скорости термической деструкции горючих материалов, что расширит представления о механизме процессов.

Практическая значимость. Применение методики позволит повысить надежность данных по термической устойчивости органических горючих материалов.

Ключевые слова: термическая устойчивость; методика; эксперимент; компьютеризация; органические горючие материалы; сенсоры; продукты деструкции.

Постановка проблемы. Токсичные продукты горения – один из поражающих факторов пожара. При определенных обстоятельствах до 80 % людей на пожаре погибают от отравления продуктами горения. Так, медико-биологическими исследованиями установлено, что вдыхание продуктов горения при содержании в них 0,5 % оксида углерода (II) или 10 % углекислого газа опасно для жизни человека. Кроме CO и CO₂ опасность представляют цианиды, синильная кислота (HCN), акролеин, галогенсодержащие кислоты и газы, аммиак, альдегиды, изоцианаты, оксиды азота и серы, ароматические углеводороды, сероводород, хлористый водород, фосген [1]. Доля того или иного токсичного компонента в определяющей степени зависит от материала,

подвергающегося термической деструкции, наличия окислителя во внешней среде и т.д. Отмечается [2, 3], что вследствие широкого спектра компонентов пиролиза и непредсказуемой скорости образования побочных продуктов, зависящей от температуры, площади и состава окружающей среды, прогнозировать патофизиологические взаимодействия всех токсинов невозможно. Поэтому существенную роль играют методы определения термической стойкости материалов с образованием токсичных продуктов в зависимости от условий температурных режимов нагревания.

Анализ последних исследований. Спектроскопические методы отличаются по информационной способности, среди них выделяют ИК-спектроскопию [4] и масс-спектрометрию [5]. Сложность использования данных методов заключается в трудности расшифровки результатов смесевых составов. Этому лишен метод хромато-масс-спектрометрии [6], в котором после хроматографического разделения смеси на компоненты записывают их масс-спектры и идентифицируют каждый компонент. При выдающейся аналитической способности данного метода он предполагает наличие дорогостоящей аппаратуры, квалифицированного персонала и круглосуточной работы вакуумного оборудования. Существенная проблема – дискретность измерений. Так, стандартный метод определения термической устойчивости полимерных материалов, являющихся элементами многих строительных конструкций, – термогравиметрический анализ (ТГА) образцов в контролируемой воздушной среде. Принято, что изменение массы материала как функции температуры – показатель термической стабильности материала. На изменение массы нагреваемого образца, особенно при его малых размерах, влияют конвекционные потоки в печи, изменение плотности газовой среды и, соответственно, выталкивающей силы при изменении температуры. Кроме того, потеря массы – брутто-процесс, она часто связана с выделением воды, не являющейся токсичным компонентом. Положительный момент – непрерывное измерение во времени. Более информативен стандартный метод, сочетающий термогравиметрию и инфракрасную спектроскопию. В рамках данной методики выделяемый газ отбирают из печи дискретными частями, которые подвергают анализу. В этом способе особенно важно контролировать кривую потери массы ТГА для определения времени или температуры, при которой был проведен отбор пробы. Газообразные пробы можно периодически улавливать в обогреваемую газовую кювету малого объема на выходе ТГ-анализатора, анализировать, а затем вымывать выходящим потоком ТГА. Усовершенствование данного процесса связано с применением обогреваемой проточной кюветы для снижения конденсации анализируемых веществ. Проточную кювету располагают в инфракрасном спектрометре на пути ИК-луча. Следует отметить, что любая металлическая поверхность внутри печи ТГА, передающей линии или узла проточной кюветы может реагировать с отдельными классами выделяемых газов, например аминами, вызывая

их разложение. Это может привести к изменениям в химическом составе выделяемого газа.

Можно сделать вывод, что некоторые методы недостаточно информативны, но при этом обеспечивают непрерывные измерения. Другие могут быть весьма информативными, но их измерения дискретны или сложные и времязатратные в тривиальных лабораторных исследованиях, когда необходимо определить температурный интервал деструкции материалов, кинетику разложения при различных температурных параметрах и в зависимости от состава окружающей газообразной среды.

Цель работы – разработка компьютеризированного инструментального метода изучения деструкции органических горючих материалов при различных температурных режимах в условиях динамического и статического нагрева.

Методика эксперимента. Принципиальная схема устройства по изучению термической устойчивости материалов представлена на рис. 1.

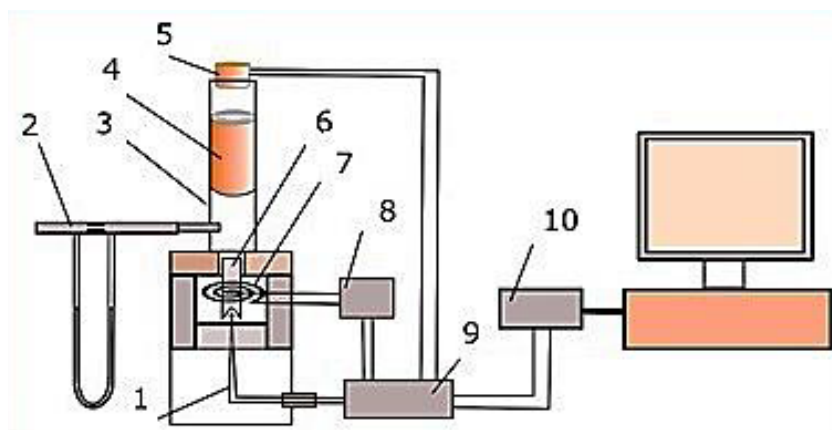


Рис. 1. Схема установки для изучения термической устойчивости:

1 – термопара; 2 – расходомер; 3 – цилиндр; 4 – теплообменник; 5 – датчик продуктов пиролиза; 6 – тигель с образцом; 7 – нагреватель; 8 – блок управления нагревателем; 9 – платформа микроконтроллера; 10 – преобразователь интерфейса USB-RS 485 или модуль Bluetooth

Основная часть установки – измерительный блок, включающий датчик продуктов пиролиза, нагреватель образца и термопару контроля температуры. Закон нагревания образца материала формируется в компьютерной программе управления нагревателем. При нагревании реализуется пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) закон управления нагревателем, который на физическом уровне обеспечивают микроконтроллер и блок управления нагревателем. Газовую среду над исследуемым образцом обеспечивают подачей газа заданного состава через расходомер в зону нагревания образца. Этот же поток газа – транспортный агент, доставляющий продукты разложения на датчик, сигнал с которого

поступает на микроконтроллер и далее, через преобразователь интерфейса, на программный OPC-сервер компьютера.

Главная измерительная часть – платформа микроконтроллера (рис. 2), которая включает собственно микроконтроллер типа ATmega328, 16-битный аналого-цифровой преобразователь, увеличивающий точность и разрешающую способность измерения температуры. Мультиплексор на базе микросхемы CD4051 позволяет подключить одновременно до восьми датчиков для измерения продуктов деструкции. Подключение измерительной части к компьютеру может быть осуществлено через модуль преобразователя USB-RS485 или через модуль Bluetooth. В последнем варианте обеспечена мобильность проведения измерений. Компьютерный интерфейс графической визуализации данных измерений и элементов управления реализован на программном пакете управления технологическими процессами MasterScada и включает окно настройки управления нагревателем и окно вывода измерительной информации в графическом виде. Результаты измерений вносят в таблицы Excel.

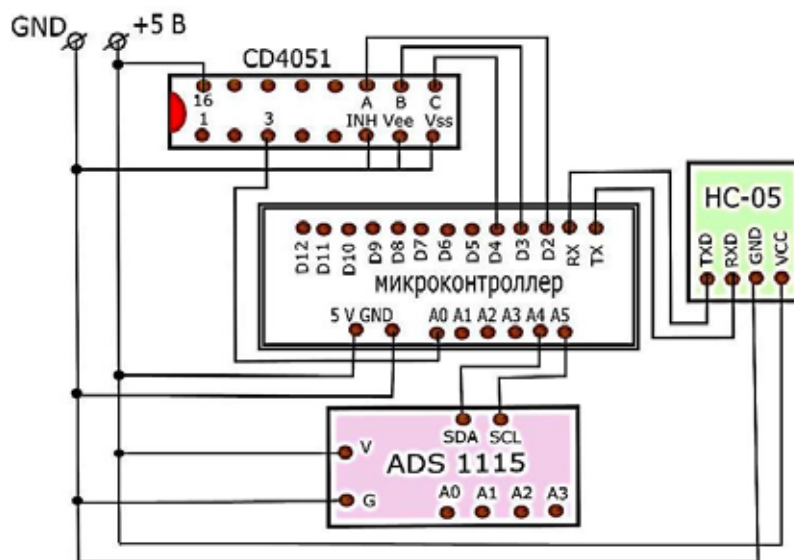


Рис. 2. Платформа микроконтроллера:

CD4051 – мультиплексор (контакты 1, 2, 4, 5, 12–15 – подключение сенсоров);
 HC-05 – модуль Bluetooth; ADS1115 – 16-битный аналого-цифровой преобразователь
 (контакты A0–A3 – входы АЦП)

Интерфейс программы управления нагревателем позволяет задавать скорость нагревания, время выдержки образцов при заданной температуре, максимальную температуру нагревания, темп охлаждения образца (рис. 3). Высокая точность поддержания заданных параметров обеспечивает хорошую воспроизводимость температурного режима нагревания. Непосредственное управление нагревателем осуществляют через полевой транзистор, управляемый сигналом широтно-импульсной модуляции (рис. 4), который формируется

в компьютерной программе управления прибором и через микроконтроллер поступает на вход транзистора. Гальваническую развязку между силовой нагревательной частью и управляющим ШИМ-сигналом микроконтроллера осуществляет оптрон HCPL-3120. При изменении напряжения питания нагревателя необходимо изменить значение резистора R2, чтобы обеспечить напряжение на выходе HCPL-3120 на уровне 16 В.

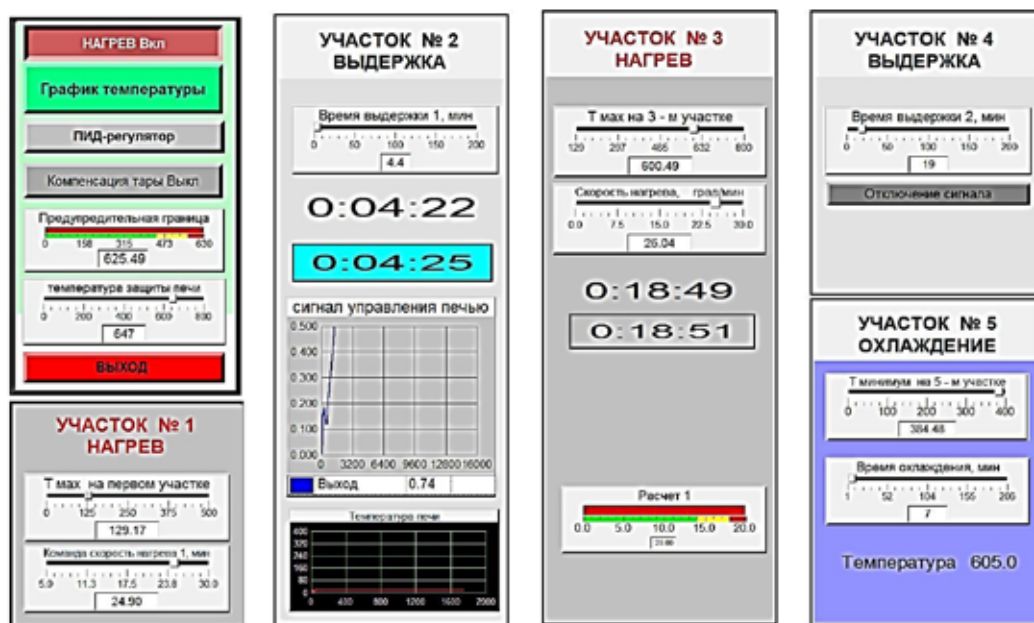


Рис. 3. Интерфейс программы управления нагревателем

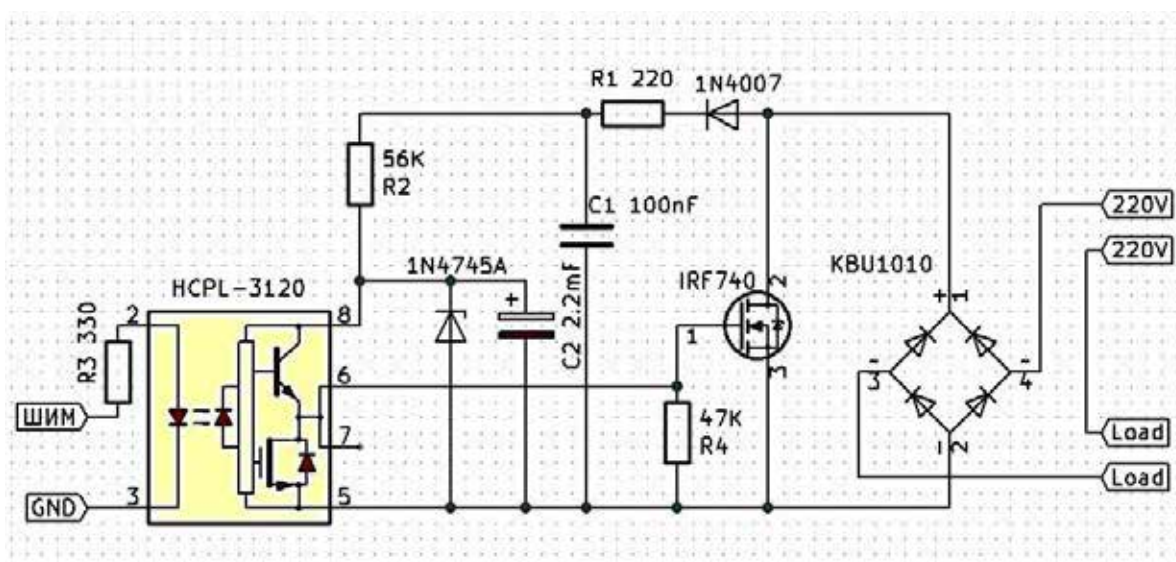


Рис. 4. Схема блока управления нагревателем

Как известно, продукты полного сгорания большинства органических материалов – термодинамически устойчивые продукты типа диоксида

углерода, воды и азота. Неполное сгорание сопровождается образованием веществ самых разных классов (табл. 1). Такая же ситуация наблюдается и при термической деструкции органических материалов. В качестве примера приведены данные ИК-спектроскопии газообразных продуктов пиролиза одного из природных полимеров – крахмала ($[C_6H_{10}O_5]_n$), химический состав которого близок к составу такого конструкционного материала, как сухая древесина (49 % С, 44 % О, 6 % Н) (табл. 2). Как видно, процесс термической деструкции вещества достаточно простого элементного состава может привести к образованию ряда соединений, включая углеводороды, спирты, альдегиды и кетены.

Таблица 1

Продукты горения и их источники

Продукт горения	Источник продукта горения
Диоксид углерода	Все органические материалы
Монооксид углерода	То же
Цианиды, синильная кислота (HCN)	Акрилонитрил, нейлон, бумага, полиуретан, нитроцеллюлоза, смолы, шелк, шерсть, древесина, полиаминная резина
Акролеин (или пропелан)	Акрелан (ковровое покрытие), полипропилен, акриловые соединения, целлулоид, целлюлоза, полиолефины
Галогенсодержащие кислоты и газы	Галогенизированные углеводороды, искусственные пленки, смолы, противопожарные смеси
Аммиак	Нейлон, смолы (меламиновые, полифенольные), шелк, древесина, полиуретан, полиамиды, полиаминная резина
Альдегиды	Ацетатная целлюлоза (пленка), хлопок, бумага, полистирол, поливинилацетат, древесина
Изоцианаты	Полиуретан
Оксиды азота	Целлулоид, нитрат целлюлозы, нефтепродукты, древесина
Ароматические углеводороды	Полистирол
Оксиды серы, сероводород	Шерсть, волосы, нефтепродукты, резина, древесина
Хлористый водород, фосген	Хлорсодержащие полимерные материалы, полиэстер, поливинилхлорид

Таблица 2

Характеристические частоты газообразных продуктов пиролиза крахмала
в интервале температуры 300...600 °С

Волновое число, см ⁻¹	Функциональная группа
3600...3700	–ОН
3008...3100	HCR=CH ₂ ; R ¹ RC=CH ₂
2960	–CH ₂ –; –CH ₃
2349	CO ₂
2140...2200	–C≡C–; (R) ₂ C=C=O
1738	–CH ₂ -CH=O; –CH ₂ -COOH
1450	–CH ₂ –; –CH ₃
1000, 1350	R-O-H
650	–C≡C–

Для фиксации газообразных продуктов деструкции материалов могут быть применены, например, мини-сенсоры производителей Figaro Engineering Inc. или Winsen Electronics. Полупроводниковые чувствительные элементы сенсоров изготовлены на основе пленок оксидов металлов, модифицированных разными металлами, зависящими от типа определяемого газообразного компонента. Наличие примесей в газовой среде вызывает изменение электрического сопротивления сенсора. Так, датчики TGS серий 2, 8 и 2000 чувствительны к наличию H₂, CO, CH₄, (CH₃)₃CH, ROH, NH₃, H₂S и других компонентов (на уровне концентраций $1 \cdot 10^{-4} \div 5 \cdot 10^{-2} \%$). При этом различают широкополосные сенсоры, чувствительные к комплексу компонентов в газовой фазе, и селективные с повышенной чувствительностью к определенным веществам. Определение оксидов азота, серы и углерода в продуктах деструкции материалов возможно высокоселективными электрохимическими датчиками типа FECS41-250, ME4-SO₂, MG811 и др. Пары воды определяют, как правило, емкостными сенсорами типа AM2301. Перспективны датчики, основанные на недисперсионной инфракрасной (NDIR) или фотоакустической (PAS) спектроскопии.

Кривые образования газообразных продуктов при нагревании древесины и березового активированного угля после адсорбции им паров бензина представлены на рис. 5(1). Как видно, деструкция образца древесины начинается при температуре около 180 °С с увеличением скорости выделения летучих компонентов до температуры 380 °С. После данной температуры скорость деструкции уменьшается, и при температуре около 500 °С наблюдают

растянутый во времени участок разложения труднолетучих компонентов и окисления образующегося углерода с выделением CO и CO₂.

Сложность процесса адсорбции и полифракционный состав бензина характеризует рис. 5(2). Как известно, бензин представляет собой смесь различных углеводородов с температурой кипения от 30 до 205 °С. Этот факт обуславливает различную их адсорбционную способность. Десорбция легких фракций начинается при ≈80 °С, а десорбция более тяжелых фракций происходит в интервале 170...500 °С. При более высокой температуре наблюдается окисление углерода активированного угля с образованием оксидов углерода.

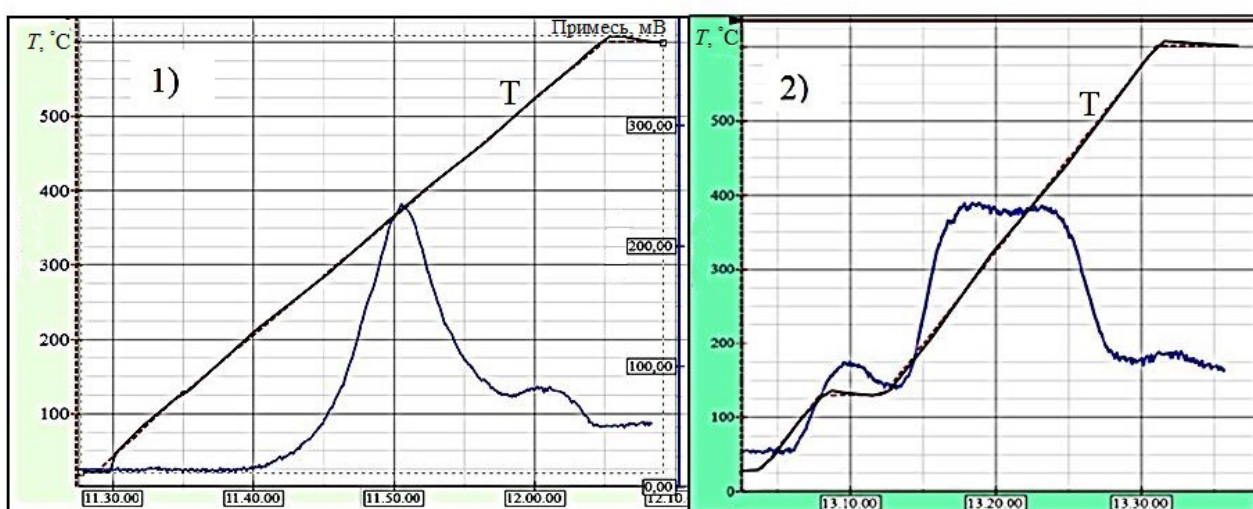


Рис. 5. Кривые термической деструкции в воздухе:
1 – опилки древесные; 2 – березовый активированный уголь
после контакта с парами бензина

Более сложные процессы характеризуют термическую устойчивость полиметилметакрилата (органическое стекло). И дериватограмма, и кривые термической деструкции с образованием газообразных соединений (рис. 6) свидетельствуют о сложном механизме разложения данного материала. При низких температурах на термогравиметрических кривых наблюдают некоторое увеличение массы, что в реальности, как отмечалось, связано с уменьшением плотности газовой среды печи. В то же время кривые термической деструкции показывают выделение в газовую фазу при температуре 100...120 °С продуктов деструкции, вероятно, мономеров, оставшихся в структуре стекла после полимеризации.

При увеличении температуры происходит разрушение полимера, о чем свидетельствуют эндотермические эффекты на кривой ДТА. При температуре более 250 °С наблюдают интенсивное разложение полимера с выделением продуктов деструкции в газовую фазу. При этом на кривых

термической деструкции в интервале температур 180...250 °С отмечают также незначительное образование газообразных продуктов, которое не фиксируют на дериватограмме.

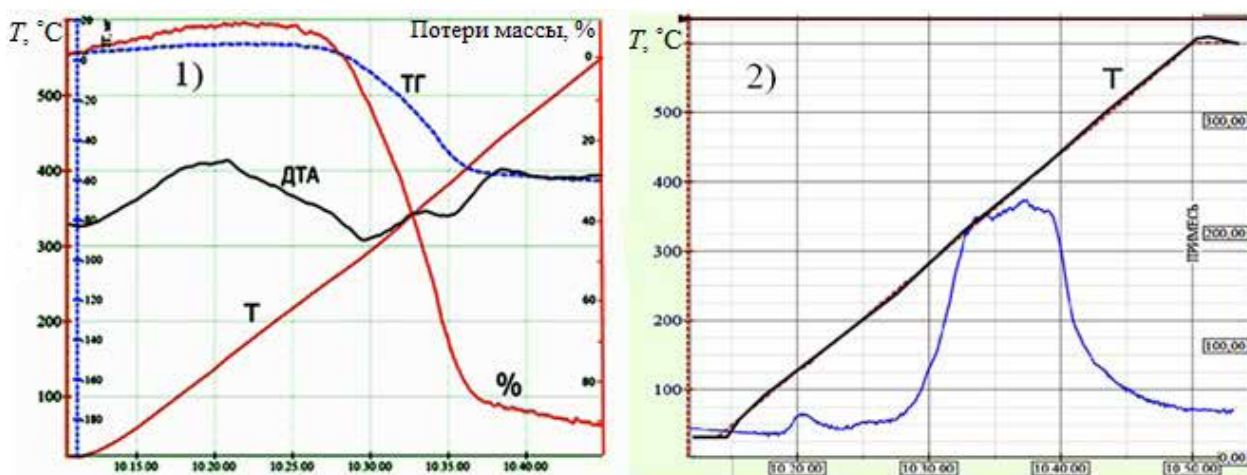


Рис. 6. Дериватограмма полиметилметакрилата (1) (масса образца 63 мг) и кривые газообразных продуктов его термической деструкции (2) (масса образца 20 мг). Скорость нагревания 15 град. · мин⁻¹

Следует отметить, что информативные возможности методики могут быть значительно расширены, если использовать не только один широкополосный датчик примесей, как в приведенных примерах, а дополнить устройство селективными сенсорами на разные продукты деструкции горючих материалов. Технически и программно на это нет ограничений.

Выводы. Разработан компьютеризированный инструментальный метод изучения термической устойчивости органических горючих материалов при различных температурных режимах в условиях динамического и статического нагревания. Методика позволяет фиксировать продукты термической деструкции горючих материалов, выделяющиеся в газовую фазу, и осуществлять сбор и накопление данных в цифровом виде. Метод позволяет повысить надежность данных по термической устойчивости органических горючих материалов. Одновременное применение в данном методе различных высокоселективных сенсоров позволит значительно расширить представления о механизме термической деструкции горючих материалов.

Список литературы / References

1. Сарманаев, С.Х. Токсико-химическое поражение на пожаре / С.Х. Сарманаев, В.А. Башарин, П.Г. Толкач, К.А. Шербашов // Медлайн.Ру: биомед. журн. – 2015. – Т. 16. – С. 434 – 442.

Sarmanayev, S.Kh., Basharin, V.A., Tolkach, P.G., Sherbashov, K.A. *Toksikokhimicheskoye porazheniye na pozhare* [Toxic-chemical exposure in a fire]. *Medlayn. Ru: biomed. zhurn. [Medline.ru: biomedical journal]*, 2015, vol. 16, pp. 434 – 442.

2. Antonio, A.C.P., Castro, P.S., Freire, L.O. Smoke inhalation injury during enclosed space fires: an update. *Jornal Brasileiro de Pneumologia*, 2013, vol. 39, no 3, pp. 373 – 381.

3. Hampson, N.B., Weaver, L.K. Carbon monoxide poisoning: a new incidence for an old disease. *Undersea and hyperbaric medicine journal*, 2007, no. 34, pp. 163 – 168.

4. Тарасевич, Б.Н. Основы ИК-спектроскопии с преобразованием Фурье / Б.Н. Тарасевич. – М.: МГУ, 2012. – 22 с.

Tarasevich, B.N. *Osnovy IK-spektroskopii s preobrazovaniyem Fur'ye* [Fundamentals of Fourier-transform infrared spectroscopy]. Moscow, MGU Press, 2012, 22 p.

5. Бёккер, Ю. Спектроскопия / Ю. Бёккер; пер. с немецкого. – М.: Техносфера, 2009. – 528 с.

Byokker, Yu. *Spektroskopiya* [Spectroscopy]. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009, 528 p.

6. Винарский, В.А. Масс-спектрометрия и хромато-масс-спектральный анализ / В.А. Винарский, Р.А. Юрченко. – Минск: БГУ, 2013. – 135 с.

Vinarskiy, V.A., Yurchenko, R.A. *Mass-spektrometriya i khromato-mass-spektral'nyy analiz* [Mass spectrometry and chromatography-mass spectrometric analysis]. Minsk, BGU Press, 2013, 135 p.

Рекомендовано к публикации д-ром хим. наук Л.Ф. Бутузовой
Дата поступления рукописи 26.10.2020

Valery Vasilyevich Shapovalov, Dr. Sci. (Chem.), department chair;

e-mail: wwshapovalov@gmail.com; phone: (+38 062) 301-03-87;

Alina Anatolyevna Berestovaya, senior lecturer; e-mail: berestova865@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

Vladislav Vyacheslavovich Shloma, engineer of the 1st category; e-mail: ilsin1995@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) 332-78-51

INSTRUMENTAL DETERMINATION OF THERMAL STABILITY OF MATERIALS

Purpose. Elaboration of an instrumental methodology for determination of the thermal stability of organic flammable materials.

Methodology. It is based on the elaborated computer-automated installation for determination of the thermal stability of flammable materials during variations of their temperature by the continuous measurement of the gaseous destruction products.

Results. The experimental installation of the pyrolysis of organic flammable materials has been developed. The computer controlled thermal block for heating the samples is the installation main part. The high variation of the program allows investigating the thermal stability of materials within the wide range of time and thermal parameters. The possibility to install up to eight controllers of the thermal destruction products has been included. The measurement data are formed into a digital file that makes the further analysis and processing of measurement results easier.

Scientific novelty. The methodology allows collecting the information about products and velocity of the thermal destruction of flammable materials in the dynamic mode and in the different temperature conditions what will expand the knowledge about the process mechanism.

Practical value. The application of the methodology will make it possible to improve the reliability of data on the thermal stability of the organic flammable materials.

Keywords: thermal stability; methodology; experiment; computerization; organic flammable materials; sensors; products of destruction.

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [551.578.46:625.7]:629.464.2

Андрей Викторович Агарков, замминистра; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

Елена Вячеславовна Лопатина, гл. специалист; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

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;

Наталья Александровна Калиниченко, инж.; e-mail: kalinichenko_080597@mail.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-40

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИКВИДАЦИИ СНЕЖНЫХ ЗАНОСОВ

Цель. Определение путей повышения эффективности ликвидации снежных заносов.

Методика. Аналитические исследования, экспериментальное изучение параметров снежных заносов на территории ДНР.

Результаты. Разработана методика расчета риска образования снежных заносов, предложен вариант районирования ДНР по сложности борьбы со снегом.

Научная новизна. Использование методов теории вероятности для расчета риска образования снежных заносов с учетом влияния скорости и направления ветра.

Практическая значимость. Реализация методики расчета риска снежных заносов в ДНР, районирование территории на основе этой методики и размещение пунктов снегоуборочной техники в соответствии с логистикой подачи техники к месту проведения снегоуборочных работ.

Ключевые слова: снежные заносы; теория вероятности; риск; трудность уборки снега; толщина снежного покрова; пункты сосредоточения снегоуборочной техники.

Постановка задачи. Общая протяженность автомобильных дорог, проходящих по территории ДНР, 2197,6 км, из которых автомобильных дорог государственного значения 704,8 км, автомобильных дорог местного значения 1492,8 км.

Автомобильные дороги относятся к категории промышленных объектов, которые должны функционировать с максимально возможной эффективностью при стихийных бедствиях, авариях и катастрофах.

К числу обычных для Донецкой Народной Республики относится такой вид стихии, как снежные заносы. Поэтому анализ условий и факторов, которые сопровождают данный вид стихийных бедствий, а также выбор эффективных средств борьбы и ликвидации последствий позволяют в кратчайший срок частично или полностью возобновить ситуацию до уровня, который отвечает нормальному функционированию транспортных сетей, промышленных и хозяйственных объектов. Обеспечение проходимости дорог в зимнее время

и ликвидация образовавшихся снежных заносов – важные задачи, стоящие перед Единой государственной системой предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЕГСЧС).

Цель статьи – анализ условий и факторов, которые сопровождают такие стихийные бедствия, как снегопады и снежные заносы на автомобильных дорогах, районирование территории ДНР по риску возникновения заносов, а также повышение эффективности ликвидации последствий снежных заносов.

Анализ последних публикаций. В работе [1] рассмотрены вопросы современного состояния борьбы со снежными заносами на железнодорожном транспорте. В других работах анализируют технические вопросы борьбы со снегом на автомобильных дорогах и проблемы обновления парка снегоуборочных машин.

Изложение основного материала. Существующие методики определения объема снегоприноса, описанные в нормативной и учебной литературе, рассматривают возникновение снежных отложений на поверхности дорог как детерминированный процесс. Однако аккумуляция снежных масс на поверхности автомобильной дороги зависит в первую очередь от природных процессов, которые сложно смоделировать детерминированными методами. Для моделирования таких процессов необходимы методики, основанные на теории вероятности, которые будут учитывать суммарное воздействие на процесс снегоотложения всех природных факторов. Применив такую модель, можно рассчитать размер снегоприноса и вероятность возникновения снежного заноса, что, в свою очередь, позволит районировать территорию ДНР по вероятности возникновения снежных заносов и в соответствии с этим распределить силы и средства для борьбы с этим явлением, разработать методику эффективной очистки автомобильных дорог от снежных заносов.

Один из наиболее важных природных факторов, влияющих на снегопринос, – направление ветра и его скорость. Основная формула для расчета снегоприноса имеет вид [2]

$$Q_{\text{прин}} = Q_{\text{пер}} \sin \alpha, \quad (1)$$

где $Q_{\text{прин}}$ – объем снегоприноса, м^3 ;

$Q_{\text{пер}}$ – объем снегопереноса, м^3 ;

α – угол между направлением ветра и осью автомобильной дороги.

$$Q_{\text{пер}} = CV^3t, \quad (2)$$

где C – коэффициент пропорциональности, который зависит от плотности снега в метелевых сугробах, с^2 ;

V – скорость ветра на высоте флюгера, м/с ;

t – время действия метелевого потока, с .

Теория риска представляет собой теорию, в которой сравнивают распределение фактической переменной с распределением ее критического значения. Под критическим понимается значение $h^{кр}$, при котором риск возникновения нежелательного события становится равным 0,5.

При отсутствии доминирующего фактора закон распределения вероятности критического значения независимой величины должен оставаться таким же, как и закон распределения вероятности фактической независимой величины, установленный в соответствующих условиях экспериментально.

В работе [3] принят следующий подход к обоснованию критического закона распределения вероятностей. При расчете риска безопасного функционирования какой-либо системы на основе опытных данных устанавливается фактический закон распределения физически измеряемой величины и определяются ее параметры $A_{ср}$ и среднее квадратичное отклонение $\sigma_{A_{ср}}$, затем, в предположении, что закон распределения не изменится (это очевидно при отсутствии доминирующего фактора), определяются критические параметры $A_{кр}$, $\sigma_{кр}$, например, методом теории ошибок. Применим этот метод к определению риска возникновения снежного заноса.

На основании зависимостей теории риска, разработанных В.В. Столяровым [3], получено следующее уравнение для расчета риска возникновения снежного заноса:

$$r = 0,5 - \Phi \left(\frac{Q_{кр} - Q_{ср}}{\sqrt{\sigma_{Q_{кр}}^2 + \sigma_{Q_{ср}}^2}} \right), \quad (3)$$

где Φ – функция Лапласа;

$Q_{кр}$ – критический объем снегоприноса, при котором риск возникновения снежного заноса будет равен 0,5, м³;

$Q_{ср}$ – среднее значение объема снегоприноса, м³;

$\sigma_{Q_{кр}}$ – среднеквадратическое отклонение критического объема снегоприноса;

$\sigma_{Q_{ср}}$ – среднеквадратическое отклонение среднего значения объема снегоприноса.

$$Q_{кр} = 2Q_{доп} - \frac{\sqrt{Q_{доп}^2 + \left[25(C_V^{Q_{кр}})^2 - 1 \right] (Q_{доп}^2 - 25\sigma_{Q_{доп}}^2)} - Q_{доп}}{25(C_V^{Q_{кр}})^2 - 1}, \quad (4)$$

где $Q_{доп}$ – допустимый объем снегоприноса, м³;

$C_V^{Q_{кр}}$ – коэффициент корреляции объема снегоприноса, м³.

Формула (4) применима в том случае, если $C_V^{Q_{кр}} \neq 0,2$, при $C_V^{Q_{кр}} = 0,2$

критический объем снегоприноса будем определять по формуле

$$Q_{кр} = 2Q_{доп} - \frac{Q_{доп}^2 - 25\sigma_{доп}^2}{2Q_{доп}}. \quad (5)$$

Среднеквадратическое отклонение критического и допустимого объема снегоприноса определяют по формулам

$$\sigma_{Q_{кр}} = C_V^{Q_{кр}} Q_{кр}; \quad (6)$$

$$\sigma_{Q_{доп}} = C_V^{Q_{доп}} Q_{доп}. \quad (7)$$

Таким образом, имеем зависимость для расчета риска образования снежных заносов. Риски рассчитывают для систем, которые нормально функционируют при $Q_{кр} \gg Q_{ср}$.

Допустимый объем снегоприноса можно принять согласно Указаниям по производству изысканий и проектированию лесонасаждений вдоль автомобильных дорог ВСН 33-87. В случае, если автомобильная дорога проходит по плодородным землям, допустимый объем снегоприноса равен 25 м^3 , если проектируемая дорога проходит не по плодородным землям, то допустимый объем снегоприноса равен 10 м^3 . Графическая зависимость риска возникновения снежного заноса при различном среднем значении объема снегоприноса показана на рис. 1 и 2.

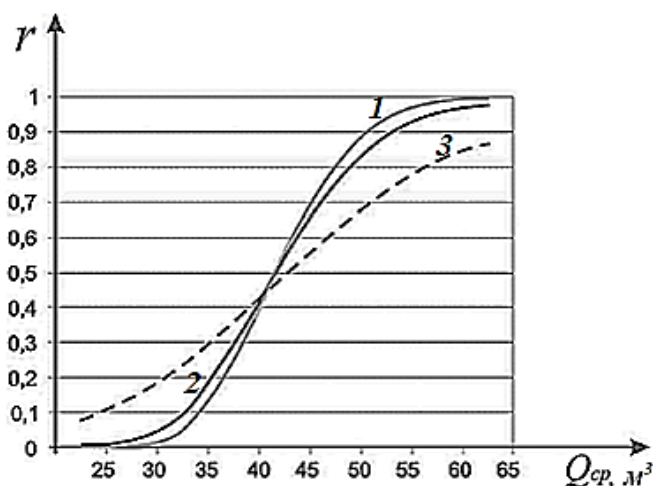


Рис. 1. График зависимости риска возникновения снежного заноса от величины объема снегоприноса $Q_{доп} = 25 \text{ м}^3$:

$$1 - C_V = 0,1; 2 - C_V = 0,2; 3 - C_V = 0,3$$

Среднее значение снегоприноса ($Q_{ср}$) в каждом районе определяют по данным Гидрометцентра ДНР с момента начала фиксации этого показателя и по сегодняшний день.

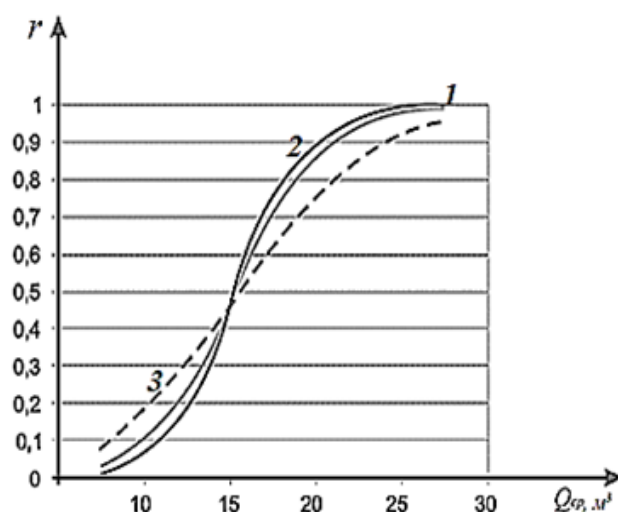


Рис. 2. График зависимости риска возникновения снежного заноса от объема снегоприноса $Q_{доп} = 10 м^3$:

$Q_{ср}$ – объем снегоприноса; r – риск возникновения снежного заноса;

C – коэффициент корреляции;

1 – $C_v = 0,1$; 2 – $C_v = 0,2$; 3 – $C_v = 0,3$

При построении графиков, изображенных на рис. 1 и 2, коэффициент корреляции допустимого объема снегоприноса принимали равным 0,15, а коэффициент корреляции критического объема снегоприноса – равным 0,1; 0,2; 0,3.

Наибольшая эффективность при работах по снегоочистке может быть достигнута в случае, когда для каждой дороги, а еще лучше – для отдельных ее участков, отличающихся по условиям снегоочистки от соседних, будут правильно выбраны типы и количество снегоочистителей, разработаны схемы снегоочистки и ликвидации снежных заносов, назначены пункты стоянки снегоуборочной техники и маршруты ее продвижения к местам образования заносов.

Наиболее удобно и приемлемо для условий ДНР районирование территории по трудности снегоочистки, исходя из допустимой толщины слоя рыхлого снега на поверхности дорожного покрытия $h_{доп}$ [4]:

- для дорог с двухполосным движением и интенсивностью движения от 100 до 1000 автомобилей в сутки

I – легкая зона по трудности снегоочистки $h_{доп} = 15$ см;

II – средняя зона по трудности снегоочистки $h_{доп} = 20$ см;

III – тяжелая зона по трудности снегоочистки $h_{доп} = 25$ см;

- для автодорог с однополосным движением и интенсивностью движения до 100 автомобилей в сутки

I – легкая зона по трудности снегоочистки $h_{доп} = 20$ см;

II – средняя зона по трудности снегоочистки $h_{доп} = 25$ см;

III – тяжелая зона по трудности снегоочистки $h_{\text{доп}} = 30$ см.

По толщине $h_{\text{доп}}$ рассчитывают нормативное время снегоочистки:

$$T_{\text{сп}} = \frac{h_{\text{доп}} \gamma_{\text{сн}}}{i_{\text{рс}} \gamma_{\text{в}}}, \quad (8)$$

где $\gamma_{\text{сн}}$ – объемная масса выпавшего на дорожное покрытие снега ($\gamma_{\text{сн}} = 0,3$ г/м³);

$\gamma_{\text{в}}$ – объемная масса воды ($\gamma_{\text{в}} = 1$ г/м³);

$$i_{\text{рс}} = \frac{q_i}{n t_{\text{сн}}}, \quad (9)$$

$i_{\text{рс}}$ – расчетная интенсивность снегопада, м/ч;

q_i – среднее количество осадков самого снежного месяца, м;

n – количество снегопадов для данного месяца (количество дней с осадками более 5 мм);

$t_{\text{сн}}$ – средняя продолжительность снегопада, ч.

Основной показатель, который характеризует заснеженность территории, – объем пуржистого переноса, т.е. количество снега, который переносится через площадь поперечного сечения ветрового потока шириной 1 м за определенный период. По данному показателю можно судить о максимально возможных объемах снежных заносов на данной территории или в данной климатической зоне в целом.

Как проявление признаков чрезвычайной ситуации при снежных заносах с точки зрения движения транспорта выступают:

- прерывание транспортной связи;
- малое время формирования снежного сугроба, которое практически не позволяет вовремя и в полном объеме провести профилактические меры по снижению влияния чрезвычайной ситуации;
- специфика снегоуборочной техники, которая состоит в узкоцелевом ее назначении и практической невозможности использования в других целях. Данный фактор приводит к снижению экономических показателей предприятий, которые содержат на своем балансе подобную технику;
- существенное повышение вероятности аварий при заносах, когда движение транспортных средств не заблокировано полностью, а существенно затруднено;
- сложность доставки к месту назначения снегоуборочной и аварийно-спасательной техники через заторы на дорогах, в частности, в тех местах и зонах, где специальная техника особенно необходима.

Очищают автомобильные дороги от снега специальными снегоочистительными машинами (см. таблицу). Основной вид очистки дорог от снега – патрульная снегоочистка, которая осуществляется периодическими проходами плужных и плужно-щеточных снегоочистителей по закреплённому

участку в течение всей метели или снегопада. Патрульную снегоочистку производят одиночные снегоочистители или отряд плужно-щеточных снегоочистителей, движущихся уступом с интервалом 30...60 м с перемещением снега от оси дороги к обочине с перекрытием следа на 0,3...0,5 м.

Условия применения снегоочистительных машин

Машина	Предельная плотность снега, г/см ³	Предельная толщина слоя снега, м		Целесообразная область применения	
		при полной ширине захвата	при неполной ширине захвата	Основная область применения	Возможная область применения
Одноотвальный плужный снегоочиститель	0,3	0,3	0,7	При патрульной снегоочистке	Уширение полосы расчистки
То же, с боковым отвалом	0,3	0,3	—	Уширение полосы расчистки при патрульной снегоочистке	Патрульная снегоочистка
То же, со средним ножом	0,5	0,1	0,3	Ликвидация снежного наката в начальной стадии его образования	То же
Двухотвальный плужный снегоочиститель на автомобильном шасси	0,4	0,4	0,8	Расчистка снежных заносов до 0,5 м	Уширение полосы расчистки
Двухотвальный снегоочиститель на шасси трактора	0,6	1,0	1,2	Прокладка снегозащитных траншей. Устройство автозимников	Расчистка заносов. Прокладка колонных путей
Шнекороторные и фрезерно-роторные снегоочистители	0,6	1,5		Расчистка снежных заносов или снегопадных отложений большой толщины. Удаление снежных валов. Расчистка лавинных завалов	
Автогрейдеры	0,6	0,5	0,6	Расчистка снежных завалов и снегопадных отложений средней толщины	
Бульдозеры	0,7	1,0		Расчистка снежных отложений большой толщины	Прокладка снежных траншей
Валоразбрасыватели	0,6	1,5		Удаление снежных валов	

Очистку необходимо начинать сразу же с момента снегопада или метели. При задержке с началом работ рыхлый снег колеса автомобилей превращают в накатный слой, практически не снимаемый при патрульной снегоочистке.

Технологическая схема работы патрульных машин зависит от ширины очищаемой поверхности дороги, направления и скорости ветра. Звено снегоочистительных машин подбирают так, чтобы за один проход в одном направлении снег убирался с половины очищаемой поверхности дороги без образования валов на обочине более допустимой толщины.

Расчищают двухполосные дороги при отсутствии сильного бокового ветра от оси к обочинам (рис. 3) последовательными круговыми проходами звена одноотвальных плужных снегоочистителей с отбрасыванием снега за пределы земляного полотна.

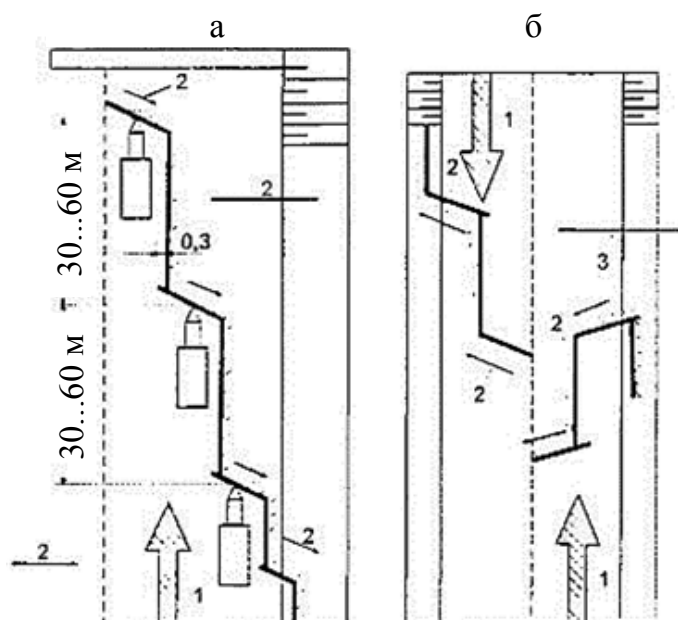


Рис. 3. Технологические схемы очистки дорог от снега:

а – от оси к обочинам; б – от одной обочины к другой по направлению ветра;

1 – направление движения снегоочистительных машин; 2 – направление отбрасывания снега; 3 – направление ветра

Усиленная снегоочистка или расчистка снеготаносов небольшой толщины. Во время сильных метелей и снегопадов, когда на отдельных участках дорог образуются снежные косы и переметы или накопились снежные отложения толщиной более 20...30 см, в состав звена по очистке дорог включают плужный двухотвальный снегоочиститель, который движется по оси дороги и пробивает косы и переметы, а идущие за ним одноотвальные снегоочистители сдвигают снег к обочинам, расчищая дорогу на полную ширину.

Снежные валы удаляют с помощью роторных снегоочистителей. Если валы сдвинуты на кюветы, то для их удаления применяют роторные снегоочистители

на гусеничном ходу или валоразбрасыватели с выносным рабочим органом. При отсутствии таких машин для удаления валов, расположенных над кюветами, применяют автогрейдеры или универсальные бульдозеры в комплексе с роторными снегоочистителями на колесном ходу. Автогрейдер сдвигает снег из вала на дорожное полотно, а роторный снегоочиститель отбрасывает его в сторону.

Расчистка снежных заносов большой толщины. При расчистке заносов толщиной до 1 м применяют двухотвальные и роторные снегоочистители. Первый проход осуществляет двухотвальный плужный тракторный снегоочиститель. За один проход он расчищает полосу шириной 3,5...4 м, обеспечивая проезд автомобилей в одну сторону, затем по кольцевой схеме расширяет полосу очистки. Вслед за плужными движется роторный снегоочиститель, который убирает снег из образовавшегося вала и расширяет полосу проезда до необходимого размера (рис. 4).

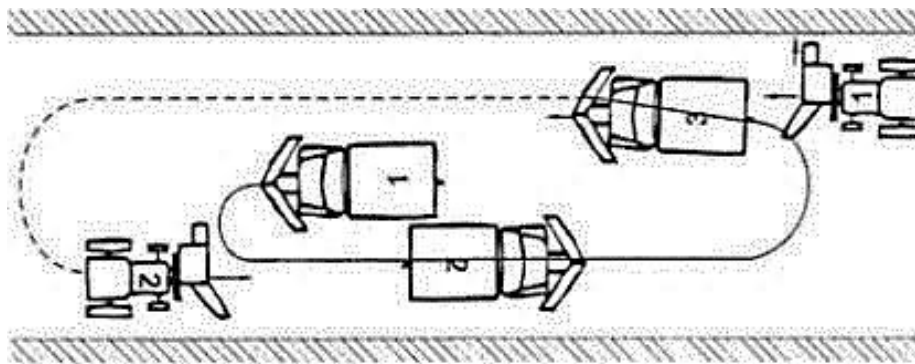


Рис. 4. Пробивание глубоких заносов на дорогах двухотвальным плужным и плужно-роторным снегоочистителем:
1–3 – последовательность движения машин

Расчистку заносов толщиной более 1 м выполняют с использованием всей имеющейся техники. Наиболее эффективно применение бульдозера с поворотным ножом, который последовательными проходами перемещает снег к обочине, откуда его роторными снегоочистителями перебрасывают за пределы полотна. При отсутствии снегоочистителей применяют бульдозеры с неповоротным отвалом, которые расчищают снежные отложения поочередными проходами в одну и другую сторону от дороги под острым углом к ее оси. Снег сдвигают на расстояние 15...20 м от бровки земляного полотна.

При очень больших заносах, когда участок дороги полностью занесен снегом толщиной 2...3 м и более, для расчистки можно применять лишь фрезерно-роторные снегоочистители на тракторах с гусеничным ходом. Они могут последовательными проходами расчищать траншею по ярусам высотой до 1,2 м. Вначале расчищают траншею для однопутного движения и примерно

через каждые 500 м устраивают объезды. Далее траншею расширяют для двухпутного движения. Для очистки пересечений в одном и разных уровнях необходимо разрабатывать специальные схемы движения снегоочистительных машин.

Потребность в машинах для выполнения объемных работ по очистке дорог от снежных заносов определяют по формуле

$$N_w = \frac{W}{P_s t_n}, \quad (10)$$

где N_w – требуемое количество машин для объемных работ по снегоочистке;
 W – объем снега, подлежащего уборке за один цикл, м³;
 P_s – производительность одной машины, м³/ч;
 t_n – нормативный срок расчистки дорог, ч.

Если нет фактических данных об объемах снегоотложений, их можно ориентировочно определить по формуле

$$W = \sum_i^n W_{сд} f L_i, \quad (11)$$

где n – количество участков с сильными заносами;
 $W_{сд}$ – снегопринос к дороге, м³/м;
 f – коэффициент задержания снега, который принимают равным 0,9 для выемок и 0,4 для нулевых отметок, низких насыпей, участков с ограждениями;
 L_i – длина каждого участка, м.

В ДНР для расчистки дорог от снега и проведения аварийно-спасательных работ привлекают следующую технику МЧС ДНР:

- автоцистерны на базе автомобилей повышенной проходимости «Урал», ЗИЛ-131, КамАЗ-4310;
- гусеничный многоцелевой тягач МТ–ЛБ;
- путеукладчик БАТ-2;
- роторный снегоочиститель Schmidt Supra 5001.

Путеукладчик БАТ-2 обеспечивает расчистку дорог при помощи универсального бульдозерного оборудования, которое может устанавливаться в трех положениях: бульдозерное, грейдерное и двухотвальное. Соответственно указанным положениям ширина отвала может равняться 4,57, 4,285 и 4 м.

Роторный снегоочиститель Schmidt Supra 5001 – специальная машина, предназначенная для очистки от снега взлетно-посадочных полос аэродромов.

Путеукладчик и роторный снегоочиститель расположены в Республиканском спасательном центре МЧС ДНР и удалены от ремонтной базы и предполагаемых мест борьбы со снежными заносами.

Один из путей решения этой проблемы – модернизация и увеличение парка снегоуборочного оборудования. Например, закупка фрезерно-роторных снегоочистителей на базе колесного трактора.

Выводы

- Успех борьбы определяется, помимо всего прочего, районированием защищаемой территории ДНР. В качестве параметра районирования выбран риск образования снежных заносов. Для практической реализации методики расчета риска требуется накопление необходимых метеорологических данных за несколько лет.
- Наиболее приемлемым для условий ДНР остается районирование территории по трудности снегоочистки исходя из толщины слоя рыхлого снега.
- Замена дорогостоящей и практически монофункциональной снегоуборочной техники более дешевой и многофункциональной позволит увеличить парк и создать помимо Республиканского спасательного центра МЧС ДНР пункты хранения в других зонах. Это будет способствовать снижению времени снегоуборки.
- Дальнейшие исследования предполагают фактическую реализацию методики расчета риска снежных заносов в ДНР, размещения пунктов снегоуборочной техники в соответствии с логистикой подачи техники к месту проведения снегоуборочных работ.

Список литературы / References

1. Ярмолинский, В.А. Зимнее содержание автомобильных дорог Дальнего Востока / В.А. Ярмолинский; Тихоокеан. гос. ун-т. – Хабаровск, 2012. – 207 с.
Yarmolinskiy, V.A. *Zimneye soderzhaniye avtomobil'nykh dorog Dal'nego Vostoka* [Winter maintenance of the Far East motor roads]. Tikhookeanskiy gos. un-t Press, Khabarovsk, 2012, 207 p.
2. Пащенко, Л.В. Строительство, реконструкция и эксплуатация конструкций и сооружений железнодорожного транспорта / Л.В. Пащенко, В.И. Потапенко // Сборник научных трудов ДонИЖТ. – 2016. – № 43. – С. 22 – 33.
Pashchenko, L.V., Potapenko, V.I. *Stroitel'stvo, rekonstruktsiya i ekspluatatsiya konstruktsiy i sooruzheniy zheleznodorozhnogo transporta* [Construction, reconstruction and operation of rail transport structures and installations]. *Sbornik nauchnykh trudov DonIZhT – Proceedings of the DonIZhT*, 2016, no. 43, pp. 22 – 33.
3. Столяров, В.В. Определение средних значений и средних квадратических отклонений в законах распределения критических величин / В.В. Столяров // Проблемы транспорта и транспортного строительства: межвуз. науч. сб. – Саратов: СГТУ, 2006. – С. 5 – 22.
Stolyarov, V.V. *Opredeleniye srednikh znacheniy i srednikh kvadratischeskikh otkloneniy v zakonakh raspredeleniya kriticheskikh velichin* [Determination of

mean values and root-mean-square quadratic deviations in the laws of distribution of critical values]. *Problemy transporta i transportnogo stroitel'stva: mezhvuz. nauch. sb.* [Problems of transport and transport construction: interuniversity scientific collection]. Saratov, SGTU Press, 2006, pp. 5 – 22.

4. Петров, Л.В. Технические проблемы борьбы со снежными заносами на дорогах ДНР / Л.В. Петров // Пожарная и техническая безопасность. – 2019. – № 3(4). – С. 152 – 157.

Petrov, L.V. *Tekhnicheskiye problemy bor'by so snezhnymi zanosami na dorogakh DNR* [Technical problems of snowdrifts removal on the DPR roads]. *Pozharnaya i tekhnicheskaya bezopasnost' – Fire and technical safety*, 2019, no. 3(4), pp. 152 – 157.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 22.09.2020

Andrey Viktorovich Agarkov, Deputy Minister; mchs-dnr@mail.ru;

Yelena Vyacheslavovna Lopatina, chief specialist; e-mail: mchs-dnr@mail.ru

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

Natalya Aleksandrovna Kalinichenko, engineer; e-mail: kalinichenko_080597@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) 332-78-40

EFFECTIVENESS IMPROVEMENT OF REMOVAL OF SNOWDRIFTS

Purpose. Determination of methods for the effectiveness improvement of snowdrifts removal.

Methodology. Analytical investigations, experimental study of parameters of snowdrifts on the territory of the Donetsk People's Republic.

Results. The methodology for calculating the risk of snowdrifts formation has been developed; a suggestion for dividing the DPR territory into districts according to the complexity of snow removal has been proposed.

Scientific novelty. Employment of the probability theory methods for calculation of the snow drift formation risk taking into account the influence of wind velocity and direction.

Practical value. Realization of the calculation methodology of snowdrifts risk formation in the DPR, division of the territory into districts on the basis of this methodology and deployment of the snow-removal equipment stations in accordance with logistics of delivering the equipment to a location for conducting the snow-removal works.

Keywords: *snowdrifts; probability theory; snow-removal complication; risk; thickness of snow cover; concentration stations of the snow-removal equipment.*

УДК 622.822.22

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-83*

ХИМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ УГЛЯ И ЕГО ИНКУБАЦИОННЫЙ ПЕРИОД САМОВОЗГОРАНИЯ ПРИ ОБРАЗОВАНИИ СКОПЛЕНИЙ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ

Цель. Исследование изменения химической активности угля различных шахтопластов Донбасса при уменьшении размера его частиц для определения инкубационного периода самовозгорания.

Методика. Экспериментальные аналитические исследования константы скорости окисления различных шахтопластов Донбасса при уменьшении размера частиц и их инкубационного периода самовозгорания.

Результаты. Проведенные исследования показали, что большая часть угольных пластов образует угольную пыль, химическая активность и инкубационный период самовозгорания которой существенно выше, чем угля в массиве.

Научная новизна. Экспериментально установлено, что инкубационный период самовозгорания угля в отложениях угольной пыли резко снижается по сравнению с инкубационным периодом самовозгорания в скоплении угля.

Практическая значимость. Полученные результаты следует учитывать для оценки опасности развития процесса самовозгорания в случаях, если возможно образование скоплений угольной пыли при ведении горных работ.

Ключевые слова: самовозгорание угля; химическая активность угля; скопления угольной пыли; инкубационный период самовозгорания; уголь.

Постановка проблемы. К особенности угля относится его способность взаимодействовать с кислородом воздуха при естественной температуре окружающей среды, что в определенных условиях может вызвать развитие процесса самовозгорания. Один из значительных факторов, влияющих на возможность образования очага самовозгорания, – химическая активность угля [1].

Согласно действующим нормативным документам Донецкой Народной Республики склонность угля к самовозгоранию определяют для всех отработываемых шахтопластов, проверяют не реже 1 раза в пять лет, устанавливают газохроматографическим методом для проб угля, состоящих из частиц размером 1...3 мм [2].

Внедрение новой мощной угледобывающей техники в высоконагруженных очистных забоях привело к увеличению образования скоплений угольной пыли, размеры частиц которой меньше 1 мм. Значительное количество угольной пыли попадает в выработанное пространство выемочных участков, где возможны ее скопления с последующим развитием процесса самовозгорания.

Наибольшая воздухопроницаемость отработанной части пласта наблюдается вдоль целиков вынимаемого угольного столба, поэтому образования скоплений

угольной пыли следует ожидать по контурам выработанного пространства. Часть пыли оседает в действующих горных выработках, однако по мере перемещения линии очистного забоя она может оказаться в выработанном пространстве выемочного участка и перераспределяться потоками фильтрующегося воздуха.

Одно из вероятных мест скоплений угольной пыли – выход дегазационных скважин в выработанное пространство. При переходе потоков воздуха из каналов, формирующихся в разрыхленной массе угля и пород, к скважине возможны резкое падение скорости движения газа и осаждение частиц пыли. К образующимся под скважинами скоплениям угольной пыли обеспечен постоянный приток воздуха, что приводит к окислению угольной пыли и может способствовать возникновению очагов самовозгорания.

Анализ последних исследований. Результаты исследований, приведенные в работе [1], свидетельствуют о снижении химической активности угля с течением времени, однако они не отражают действительного значения константы скорости окисления угольной мелочи и пыли, которая может образовываться при ведении очистных работ.

Влияние химической активности угля на процесс самонагрева рассмотрено в работе [3], при этом учитывались теплоизолирующие условия экспериментов и размеры частиц угля 1...3 мм.

В работе [4] рассмотрены метод прогноза пожароопасности потерь угля с учетом его химической активности и пример расчета инкубационного периода самовозгорания, однако представляют интерес дальнейшие исследования в данном направлении, особенно с учетом образования угольной пыли и мелочи с размерами частиц менее 1 мм.

Цель работы – исследование изменения химической активности угля различных шахтопластов при уменьшении размера частиц с учетом возрастающей возможности образования скоплений угольной пыли, а также рассмотрение изменения инкубационного периода самовозгорания угля.

Материалы и результаты исследований. Для экспериментальных исследований химической активности угля и константы скорости окисления различных проб угля использовали газохроматографический метод установления склонности угля к самовозгоранию, разработанный в НИИГД «Респиратор» [2].

Отобранные пробы угля из различных шахтопластов угольных шахт Донецкой и Луганской Народных Республик дробили и рассеивали на различные фракции в лабораторных условиях.

В качестве исходной фракции угля использовали пробы размером 1...3 мм, а в качестве угольной пыли – размером 0,5...1 мм, 0,25...0,5 мм и менее 0,25 мм.

Для каждой подготовленной фракции угля лабораторным путем на газохроматографическом комплексе «Хромос ГХ-1000» определили критическую константу скорости окисления, $k_{кр}$, м³/(моль·с), характеризующую химическую активность угля (см. табл. 1).

Таблица 1

Константа скорости окисления некоторых шахтопластов Донбасса
в зависимости от исследуемой фракции угольных проб

Шахта, угольный пласт	Константа скорости окисления, $k_{кр}$, м ³ /(моль·с), при размере угольных частиц в пробах, мм			
	1...3	0,5...1	0,25...0,5	менее 0,25
ООО «Углеком» (б/ш «Чайкино»), m_3	$2,87 \cdot 10^{-9}$	$6,18 \cdot 10^{-9}$	$7,88 \cdot 10^{-9}$	$8,85 \cdot 10^{-9}$
Им. М.И. Калинина, h_{10}	$3,41 \cdot 10^{-9}$	$5,47 \cdot 10^{-9}$	$5,55 \cdot 10^{-9}$	$5,58 \cdot 10^{-9}$
«Холодная Балка», h_{10}^B	$3,38 \cdot 10^{-9}$	$3,55 \cdot 10^{-9}$	$3,62 \cdot 10^{-9}$	$3,65 \cdot 10^{-9}$
«Вергелевская», l_5	$9,41 \cdot 10^{-10}$	$1,22 \cdot 10^{-9}$	$6,02 \cdot 10^{-9}$	$8,14 \cdot 10^{-9}$
«Ясиновская- Глубокая», l_2^1	$3,84 \cdot 10^{-9}$	$5,01 \cdot 10^{-9}$	$8,05 \cdot 10^{-9}$	$2,11 \cdot 10^{-8}$
Им. Н.П. Баракова, k_5^H	$6,36 \cdot 10^{-8}$	$8,21 \cdot 10^{-8}$	$1,11 \cdot 10^{-7}$	$3,23 \cdot 10^{-7}$
Им. Челюскинцев, l_1	$1,10 \cdot 10^{-9}$	$2,36 \cdot 10^{-9}$	$5,15 \cdot 10^{-9}$	$3,31 \cdot 10^{-9}$
«Щегловская- Глубокая», l_1	$3,52 \cdot 10^{-9}$	$3,66 \cdot 10^{-9}$	$8,14 \cdot 10^{-9}$	$8,81 \cdot 10^{-9}$
«Молодогвардей- ская», k_2^H	$2,37 \cdot 10^{-9}$	$7,45 \cdot 10^{-9}$	$2,15 \cdot 10^{-8}$	$3,31 \cdot 10^{-8}$
«Самсоновская- Западная», k_2^H	$2,97 \cdot 10^{-9}$	$6,54 \cdot 10^{-9}$	$8,88 \cdot 10^{-9}$	$2,11 \cdot 10^{-8}$
Им. С.М. Кирова, h_{10}^B	$2,59 \cdot 10^{-9}$	$2,67 \cdot 10^{-9}$	$2,77 \cdot 10^{-9}$	$2,94 \cdot 10^{-9}$

Анализ результатов исследований показывает, что уменьшение размера частиц угля до состояния пыли неоднозначно влияет на химическую активность угля различных пластов.

Например, пробы угля и пыли пласта h_{10}^B шахты им. Кирова и шахты «Холодная Балка» имеют практически одинаковые значения константы скорости окисления.

Для пласта h_{10} шахты им. М.И. Калинина характерен рост константы скорости окисления в 1,6 раза при снижении размера частиц от 1...3 мм до 0,5...1 мм, а дальнейшее уменьшение размера угольных частиц практически не изменяет показания константы скорости окисления.

Но для большинства пластов пробы пыли имеют большее значение константы скорости окисления, чем уголь размером 1...3 мм.

Так, например, измельчение угля пластов k_2^H шахт «Молодогвардейская» и «Самсоновская-Западная» и пласта k_5^H шахты им. Н.П. Баракова приводит к значительному росту константы скорости окисления при уменьшении размера частиц. Например, химическая активность угольной пыли размером менее 0,25 мм пласта k_5^H шахты им. Н.П. Баракова в 5 раз больше, чем у пробы угля размером 1...3 мм, а для пласта k_2^H шахты «Самсоновская-Западная» в 7,1 раза.

Химическая активность угля пласта l_5 шахты «Вергелевская» увеличивается более чем в 8,6 раза при измельчении до значения менее 0,25 мм.

Уголь пласта l_1 шахты «Щегловская-Глубокая» имеет особенность: при измельчении проб до размера 0,5...1 мм константа скорости окисления практически не изменяется, а вот при дальнейшем измельчении она резко увеличивается почти в 3 раза.

Один из критериев при оценке опасности развития процесса самонагрева (самовозгорания) в скоплениях угля – время инкубационного периода самовозгорания, в течение которого скопление угля разогревается до критической температуры. Большинство углей Донбасса имеет критическую температуру, близкую к 100 °С, при достижении которой процесс самонагрева (самовозгорания) приобретает необратимый характер.

Для оценки влияния измельчения на скорость самонагрева окисляющегося материала рассчитали, как изменится время инкубационного периода самовозгорания скоплений угля и угольной пыли с частицами различных размеров с учетом полученных данных по табл. 1.

Время инкубационного периода самовозгорания угля $\tau_{\text{инк}}$, сут, можно определить по формуле [2]

$$\tau_{\text{инк}} = \frac{T_{\text{кр}} + 18W^c + 3,6 \cdot 10^2 \cdot \chi - T_0}{4,8 \cdot 10^8 \cdot K_p}, \quad (1)$$

где $T_{\text{кр}}$ – критическая температура самовозгорания угля, К;

T_0 – температура окружающих пород, К;

W^c – влажность угля, %;

K_p – константа скорости окисления угля, м³/(моль·с);

χ – средняя природная газоносность, м³/кг.

Анализ формулы (1) показывает, что время инкубационного периода самовозгорания угля существенно уменьшается при повышении константы скорости окисления, а также при снижении влажности пробы и природной газоносности угля.

Время инкубационного периода рассчитывали для скоплений угля и угольной пыли некоторых пластов Донбасса, приведенных в табл. 1.

В качестве исходных данных для расчетов использовали значения константы скорости окисления и критической температуры самовозгорания, полученные

на газохроматографическом комплексе «Хромос ГХ-1000», а также данные, представленные угольными шахтами по своим шахтопластам (см. табл. 2).

Таблица 2

Время инкубационного периода самовозгорания угля в зависимости от исследуемой фракции угольных проб

Шахта, угольный пласт	Время инкубационного периода самовозгорания угля $\tau_{\text{инк}}$, сут, при размере угольных частиц в скоплении, мм			
	1...3	0,5...1	0,25...0,5	менее 0,25
ООО «Углеком» (б/ш «Чайкино»), m_3	67	34	26	22
Им. М.И. Калинина, h_{10}	78	55	53	52
«Холодная Балка», h_{10}^B	77	75	73	71
«Вергелевская», l_5	178	92	54	31
«Ясиновская-Глубокая», l_2^1	71	48	24	16
Им. Н.П. Баракова, k_5^H	18	9	7	6
Им. Челюскинцев, l_1	135	82	48	62
«Щегловская-Глубокая», l_1	84	54	28	24
«Молодогвардейская», k_2^H	46	24	10	8
«Самсоновская-Западная», k_2^H	46	30	15	12
Им. С.М. Кирова, h_{10}^B	82	77	75	72

Оценивая приведенные результаты, можно сделать вывод, что время инкубационного периода самовозгорания в отложениях угольной пыли резко сокращается для многих шахтопластов по сравнению с обычными скоплениями угля.

Так, например, время инкубационного периода самовозгорания угольной пыли с размерами частиц менее 0,25 мм пласта l_5 шахты «Вергелевская» в 6 раз меньше, чем у угля.

Практически не изменяется время инкубационного периода самовозгорания для пластов h_{10}^B шахт им. С.М. Кирова и «Холодная Балка».

Поэтому при возникновении опасности образования в выработанном пространстве выемочного участка на данном пласте скоплений угольной пыли на стадии оценки склонности угля к самовозгоранию и определения времени его инкубационного периода необходимо проводить также исследования проб угольной пыли, а при разработке мероприятий по эндогенной пожаробезопасности ориентироваться на химическую активность и время инкубационного периода самовозгорания, определенные для угольной мелочи.

Выводы

- Проведенные исследования показали, что большая часть угольных пластов образует угольную пыль, константы скорости окисления которой и время инкубационного периода самовозгорания существенно выше, чем у угля. Поэтому на всех высоконагруженных механизированных лавах, отрабатывающих шахтопласты угля, целесообразно исследовать химическую активность и рассчитывать время инкубационного периода не только для проб угля, но и для проб угольной пыли.

- Полученные результаты необходимо учитывать для оценки опасности развития процесса самовозгорания в случаях, если возможно образование скоплений угольной пыли при ведении горных работ.

Список литературы / References

1. Зависимость химической активности углей от их остаточной газоносности и продолжительности окисления / С.П. Греков, И.А. Шайтан, И.Н. Зинченко и др. // Уголь Украины. – 2006. – № 8. – С. 26 – 28.

Grekov, S.P., Shaytan, I.A., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B., Golovchenko, Ye.A. *Zavisimost' khimicheskoy aktivnosti ugley ot ikh ostatochnoy gazonosnosti i prodolzhitel'nosti okisleniya* [Dependence of coal chemical activity on its residual gas-bearing capacity and duration of oxidation]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2006, no. 8, pp. 26 – 28.

2. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. / 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 questions of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.

3. Кинетика гетерогенного окисления слоя угля и его самонагревание / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында, Е.А. Головченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2005. – Вып. 42. – С. 15 – 21.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B., Golovchenko, Ye.A. *Kinetika geterogenogo okisleniya sloya uglya i yego samonagrevaniye* [Kinetics of heterogeneous oxidation of a coal layer and its spontaneous heating]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2005, issue 42, pp. 15 – 21.

4. Метод прогноза пожароопасности потерь угля в шахтах и инкубационный период их самовозгорания / С.П. Греков, И.А. Шайтан, И.Н. Зинченко и др. // Способы и средства создания безопасных условий и здоровых условий труда в угольных шахтах: сб. науч. тр. – Макеевка: МакНИИ, 2007. – № 19. – С. 53 – 61.

Grekov, S.P., Shaytan, I.A., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B., Golovchenko, Ye.A. *Metod prognoza pozharoopasnosti poter'uglya v shakhtakh i inkubatsionnyy period ikh samovozgoraniya* [Method of fire hazard prediction for coal losses in mines and incubation period of their spontaneous ignition]. *Sposoby i sredstva sozdaniya bezopasnykh usloviy i zdorovykh usloviy truda v ugol'nykh shakhtakh: sb. nauch. tr.* [Methods and means of creating the safe and healthy working conditions in coal mines: collection of scientific papers]. Makeyevka: MakNII Publ., 2007, no. 19, pp. 53 – 61.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 30.09.2020

Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, head of department; e-mail: ennio_80@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) 332-78-83

CHEMICAL ACTIVITY OF COAL AND ITS INCUBATION PERIOD OF SPONTANEOUS IGNITION DURING FORMATION OF COAL DUST ACCUMULATIONS

Purpose. Investigation of a fluctuation of chemical activity of coal from various strata of the Donets basin during the size reduction of coal particles for determination of the spontaneous ignition incubation period.

Methodology. Experimental analytical investigations of the oxidation rate constant of various strata of the Donets basin during the size reduction of particles and their incubation period of spontaneous ignition.

Results. The conducted investigations have shown that the majority of coal strata generate the coal dust which chemical activity and spontaneous ignition incubation period are significantly higher than that of the coal in the massif.

Scientific novelty. It has been experimentally stated that the coal spontaneous ignition incubation period in the coal dust deposits abruptly decreases compared to the one in the coal accumulation.

Practical value. The obtained results should be taken into account for evaluation of the hazard of the spontaneous ignition process development in cases where there is a possibility of formation of the coal dust accumulations during carrying-out the mining works.

Keywords: *coal spontaneous ignition; coal chemical activity; coal dust accumulations; spontaneous ignition incubation period; coal.*

УДК 614.8 "363"

*Анатолий Федорович Иваненко, нач. отд.; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;
Петр Евгеньевич Мухин, канд. техн. наук, науч. сотр.; e-mail: petr63203@gmail.com
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-44*

**ВЛИЯНИЕ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА НА БЕЗОПАСНОЕ
ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Цель. Оценка влияния человеческого фактора на возникновение чрезвычайных ситуаций при эксплуатации опасных производственных объектов с учетом статистического анализа ошибок персонала.

Методы. Теоретические и информационно-аналитические исследования, статистический анализ нормативных и правовых документов Донецкой Народной Республики.

Результаты. Разработаны общие подходы к оценке риска влияния человеческого фактора на возникновение чрезвычайных ситуаций при эксплуатации опасных производственных объектов.

Научная новизна. Определены подходы, позволяющие идентифицировать потенциальные источники возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах в результате ошибочных действий человека.

Практическая значимость. Обоснование подходов к оценке риска человеческого фактора с последующей разработкой на ее основе корректирующих мероприятий, что позволит эффективно управлять охраной труда и промышленной безопасностью на предприятиях различных отраслей промышленности Донецкой Народной Республики.

Ключевые слова: *человеческий фактор; чрезвычайная ситуация; опасный производственный объект; анализ опасностей; оценка риска.*

Постановка задачи. Человеческий фактор – это термин, под которым подразумевается возможность принятия человеком ошибочных решений либо действий в конкретной ситуации, возникающая в результате взаимодействия человека, технической системы и окружающей среды. Человеческий фактор, как правило, является основной причиной возникновения чрезвычайных ситуаций на всех стадиях жизненного цикла опасных производственных объектов, а именно: подготовки проектно-технической документации, строительства, ввода в эксплуатацию, эксплуатации, реконструкции, технического перевооружения, консервации или ликвидации. Поэтому актуально формирование простых и общедоступных подходов к определению степени влияния человеческого фактора на состояние охраны труда и промышленной безопасности предприятий различных отраслей промышленности Донецкой Народной Республики.

Анализ последних исследований и публикаций. Существует значительное количество работ и документов, посвященных различным подходам и методам анализа и оценки влияния человеческого фактора на возникновение чрезвычайных ситуаций и несчастных случаев на производстве [1 – 4].

Предложенный в статье [5] комплексный подход к обеспечению безопасного функционирования производственных объектов представляет собой общие рекомендации по анализу и оценке риска чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, в которых детально не рассмотрены особенности влияния человеческого фактора.

Анализ причин чрезвычайных ситуаций, происшедших в различных отраслях промышленности Донецкой Народной Республики, указывает на необходимость всестороннего и объективного подхода к решению задачи предотвращения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах с учетом влияния человеческого фактора.

Цель и результаты исследований

Опасный производственный объект представляет собой сложную биосоциотехническую систему, состоящую из трех взаимодействующих между собой подсистем – производственный персонал («Ч»), технические устройства и объекты («Т»), окружающая (рабочая) среда («С»).

В рамках решаемой задачи чрезвычайные ситуации на опасных производственных объектах рассматриваем как отклонения параметров функционирования объекта и (или) его подсистем от штатного режима безопасного функционирования, предусмотренного нормативными документами, которые при определенных условиях могут привести к нежелательному событию (аварии, отказу, инциденту, несчастному случаю).

Официальная статистика несчастных случаев на производстве показывает, что их основные причины – технические (40 %), организационные (45 %) и психофизиологические (15 %).

Анализ статистических данных по чрезвычайным ситуациям техногенного характера выявил, что значительная их часть (свыше 80 %) происходит в результате принятых человеком ошибочных решений, которые возникают либо из-за недостатка информации, либо из-за ее неадекватного анализа и оценки, либо из-за неправильных действий персонала [2].

Возникают чрезвычайные ситуации на опасных производственных объектах чаще всего из-за ошибок, связанных с человеческим фактором, при:

- проектировании;
- изготовлении, эксплуатации и содержании технических устройств;
- техническом обслуживании компонентов подсистемы «Т» вследствие недостаточного уровня профессиональной подготовки обслуживающего персонала и (или) его неудовлетворительного оснащения необходимой аппаратурой, инструментами и материалами;
- подготовке и организации безопасных условий труда на рабочих местах;
- неудовлетворительном хранении изделий или их транспортировании с отклонениями от рекомендаций изготовителя;
- определении степени влияния подсистемы «С» на подсистемы «Ч» и «Т» с целью прогноза вероятности чрезвычайных ситуаций.

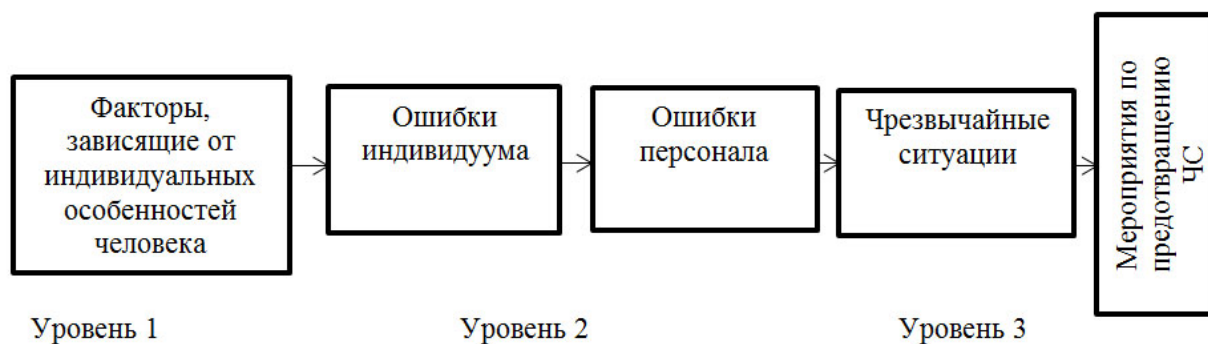
Вышеуказанные ошибки приводят к формированию предпосылок возникновения источников чрезвычайных ситуаций.

Деятельность человека с позиции анализа опасностей и оценки риска целесообразно рассматривать как подсистему опасного производственного объекта («Ч»), характеристики которой определяют антропометрическими, физиологическими, психофизиологическими и интеллектуальными возможностями индивидуума выполнять возложенные на него производственные функциональные обязанности.

Ошибочные действия человека – функция его психофизиологического состояния. Интенсивность возникновения ошибок во многом зависит от уровня профессиональной подготовки, состояния внешней (рабочей) среды и влияющих на персонал нагрузок. Рядом проведенных исследований установлено, что зависимость частоты совершения ошибок от различных нагрузок – нелинейная [3].

На вероятность совершения ошибки влияют медицинские и психофизиологические особенности индивидуума (интеллект, опорно-двигательная и психомоторная системы, скорость реакции, органы чувств) и его временное состояние (физическая и психологическая усталость, текущие функциональные нарушения организма, внезапное внешнее воздействие).

Ошибки индивидуума с целью предотвращения чрезвычайных ситуаций предлагаем рассматривать на трех уровнях (см. рисунок).



Уровни распределения ошибок индивидуума

Существует возможность: на уровне 1 – предупредить или устранить вероятность возникновения ошибки; на уровне 2 – уменьшить тяжесть последствий ошибок, корректируя неадекватное функционирование подсистемы «Ч» вследствие ошибок; на уровне 3 – исключить повторное возникновение тех или иных ситуаций, приводящих к ошибкам человека.

Применяемая методика сбора статистических данных о ЧС на опасных производственных объектах (количество аварий, инцидентов, отказов оборудования, время простоев, количество несчастных случаев и их тяжесть и др.) не предусматривает прогноза возможных нежелательных событий для разработки эффективных мер их снижения и устранения.

Поэтому предварительная идентификация существующих для человека опасностей, анализ и оценка риска их проявления, расчет качественных и количественных показателей риска, ранжирование рисков дадут возможность эффективно разрабатывать и осуществлять мероприятия по снижению и устранению риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, что, в свою очередь, позволит значительно снизить уровень производственного травматизма и предотвратить нежелательные события (несчастные случаи, аварии, инциденты, отказы технических устройств и т.п.).

Перед идентификацией опасностей необходимо детально изучить технологический процесс и рабочую среду, определить наличие потенциальных опасностей, проанализировать данные о состоянии применяемых технических устройств и приспособлений, а также предписания представителей контролирующих и инспектирующих органов, результаты экспертиз состояния промышленной безопасности и охраны труда, обстоятельства и причины происшедших ЧС, сведения о профессиональных заболеваниях и случаях травматизма, записи об обращениях за медицинской помощью за последние пять лет. При этом по возможности необходимо рассмотреть влияние на персонал организационно-технических факторов (интенсивность труда, эргономику, мотивацию, отношения в коллективе, оснащенность средствами индивидуальной защиты и т.п.).

При определении опасности необходимо установить:

- источник опасности (обстоятельства и (или) условия, при которых возможна ЧС, и количество однотипных источников, так как на многих опасных производственных объектах подверженность человека риску связана с существованием опасности определенного вида одновременно в нескольких местах, то есть вероятность травмирования персонала увеличивается пропорционально количеству таких мест);
- вероятность возникновения чрезвычайной ситуации (количественная или качественная мера вероятности наступления нежелательного события);
- последствия чрезвычайной ситуации (возможный материальный ущерб).

Риск возникновения чрезвычайной ситуации в подсистеме «Ч» в общем случае рассчитывают суммированием в соответствии с нижеприведенной формулой:

$$R = \sum_{i=1}^n P_i U_i,$$

где U_i – возможное дискретное значение ущерба здоровью и жизни работника;

P_i – вероятность наступления чрезвычайной ситуации;

n – количество возможных дискретных значений ущерба [2].

Проведенные исследования риска возникновения чрезвычайных ситуаций с учетом влияния человеческого фактора позволяют прогнозировать вероятность наступления нежелательного события. В упрощенном виде для определения уровня риска возникновения чрезвычайной ситуации предлагаем использовать матрицу, представленную в виде таблицы.

Матрица риска ЧС

Вероятность события, %		Тяжесть последствий события, баллы				
		5	4	3	2	1
Очень высокая	Свыше 80	A	B	C	C	E
Высокая	51...80	A	B	C	C	E
Средняя	21...50	A	B	C	D	E
Низкая	11...20	B	B	C	D	E
Очень низкая	1...10	B	C	C	D	E

Примечания. В данной таблице рекомендована следующая балльная классификация чрезвычайных ситуаций по тяжести последствий:

- 1 балл – легкая травма без оказания медицинской помощи в учреждении здравоохранения;
- 2 балла – легкая травма с потерей трудоспособности до 3 дней включительно;
- 3 балла – несчастный случай на производстве с потерей трудоспособности от 4 до 30 и более календарных дней;
- 4 балла – несчастный случай с тяжелыми последствиями, в том числе с потерей трудоспособности в течение 31 и более календарных дней или приведший к инвалидности или профессиональному заболеванию;
- 5 баллов – несчастный случай со смертельным исходом или групповой несчастный случай.

Буквенными индексами обозначены пять уровней риска:

A – недопустимый риск (ведение работ в опасной зоне категорически запрещено до устранения риска возникновения чрезвычайной ситуации);

B – значительный риск (необходимо приостановить производственный процесс в опасной зоне, разработать и выполнить мероприятия по снижению риска возникновения чрезвычайной ситуации);

C – допустимый риск (необходимо разработать и выполнить мероприятия по снижению риска возникновения чрезвычайной ситуации);

D – приемлемый риск (необходимо осуществлять контроль риска возникновения чрезвычайной ситуации);

E – незначительный риск (анализа, оценки риска и принятия дополнительных мер безопасности не требуется).

Выводы. Для обеспечения безаварийного функционирования опасных производственных объектов необходимо разработать методологию обучения должностных лиц, на которых возлагают функции по идентификации опасностей, их анализу, оценке и расчету рисков возникновения чрезвычайных ситуаций, разработке мероприятий по снижению рисков

и контролю их выполнения, что позволит эффективно управлять охраной труда и промышленной безопасностью на предприятиях различных отраслей промышленности Донецкой Народной Республики.

Список литературы / References

1. Галеев, А.Д. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах / А.Д. Галеев. – Казань: Изд-во КНИТУ, 2017. – 152 с.

Galeyev, A.D. *Analiz riska avariy na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh* [Analysis of accident risk at hazardous production facilities]. Kazan, KNITU Press, 2017, 152 p.

2. Гурнович, Т.Г. Оценка и анализ рисков / Т.Г. Гурнович. – М.: КНОРУС, 2019. – 252 с.

Gurnovich, T.G. *Otsenka i analiz riskov* [Risk assessment and analysis]. Moscow, KNORUS Publ., 2019, 252 p.

3. Шершнева, А.И. Способы оценки влияния человеческого фактора на появление и развитие чрезвычайных ситуаций / А.И. Шершнева, С.А. Шавуров // Информационные технологии и системы: управление, экономика, транспорт, право. – 2019. – № 2(34). – С. 241 – 244.

Shershneva, A.I., Shavurov, S.A. *Sposoby otsenki vliyaniya chelovecheskogo faktora na poyavleniye i razvitiye chrezvychaynykh situatsiy* [Methods of evaluation of the human factor influence on occurrence and development of emergencies]. *Informatsionnyye tekhnologii i sistemy: upravleniye, ekonomika, transport, pravo* – Information technologies and systems: management, economics, transport, law, 2019, no. 2(34), pp. 241 – 244.

4. Мамаев, В.В. Оценка риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах / В.В. Мамаев, А.Ф. Иваненко, П.Е. Мухин // Вестник Академии гражданской защиты. – 2019. – № 3. – С. 124 – 127.

Matayev, V.V., Ivanenko, A.F., Mukhin, P.Ye. *Otsenka riska vozniknoveniya chrezvychaynykh situatsiy na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh* [Risk assessment of occurrence of emergencies at hazardous production facilities]. *Vestnik Akademii grazhdanskoy zashchity: nauch. zhurn.* [Civil Defence Academy Journal of EMERCOM of DPR: scientific journal]. Donetsk, 2019, no. 3(19), pp. 124 – 127.

5. Иваненко, А.Ф. Комплексный подход к обеспечению безопасного функционирования опасных производственных объектов / А.Ф. Иваненко, П.Е. Мухин // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2020. – № 2(57). – С. 107 – 114.

Ivanenko, A.F., Mukhin, P.Ye. *Kompleksnyy podkhod k obespecheniyu bezopasnogo funktsionirovaniya opasnykh proizvodstvennykh ob'yektov* [The complex approach to ensuring the safe functioning of hazardous production facilities]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific

bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2020, no. 2(57), pp. 107 – 114.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 22.09.2020*

*Anatoly Fyodorovich Ivanenko, head of department; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;
Pyotr Yevgenyevich Mukhin, Cand. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: petr63203@gmail.com
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-44*

INFLUENCE OF THE HUMAN FACTOR ON THE SAFE FUNCTIONING OF PRODUCTION FACILITIES

Purpose. Assessment of influence of the human factor on occurrence of emergencies during operation of hazardous production facilities factoring in the statistical analysis of mistakes of the personnel.

Methods. Theoretical and information and analytical investigations, statistical analysis of normative and legal documents of the Donetsk People’s Republic.

Results. The common approaches to the risk assessment of the human factor influence on occurrence of the emergencies during operation of the hazardous production facilities have been elaborated.

Scientific novelty. The approaches have been determined that enable identification of the potential sources of occurrence of the emergencies at the hazardous production facilities as a result of the faulty actions of a person.

Practical value. Substantiation of the approaches to assessment of the human factor risk with the following development of the remedial actions based on it will make it possible to manage effectively the labor and industrial safety at the enterprises of various branches of industry of the Donetsk People’s Republic.

Keywords: *human factor; emergency; hazardous manufacturing entity; analysis of hazards; risk assessment.*

УДК 622.868.42

Владислав Анатольевич Чернышев, канд. техн. наук, науч. сотр.; e-mail: osmas.niigd@gmail.com;

Элеонора Геннадиевна Чайковская, ведущий инж.; e-mail: niigd.osmas-3@mail.ru;

Никита Григорьевич Зинченко, инж. I кат.; e-mail: niigd.osmas-4@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-36*

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО ЗАКРЫВАНИЯ ЛЮКОВ ПРОЕМНЫХ ТРУБ ВО ВЗРЫВОУСТОЙЧИВЫХ ПЕРЕМЫЧКАХ

Цель. Расчет параметров и разработка устройства для закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемычках, управляемого дистанционно.

Методика. Информационные исследования устройств и аналитические исследования конструкций устройств для дистанционного закрывания люков, в том числе во взрывоопасных средах.

Результаты. Рассчитаны параметры пневмоцилиндра и разработано устройство для дистанционного закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемычках, изготовлен головной образец устройства, проведены его приемочные испытания.

Научная новизна. Предложено устройство для дистанционного закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемычках с упрощенной по сравнению с аналогами конструкцией, уменьшенной массой и металлоемкостью, повысившее надежность и удобство эксплуатации.

Практическая значимость. Внедрение устройства для закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемычках, управляемого дистанционно, в подразделениях Государственной военизированной горноспасательной службы позволит повысить безопасность работы горноспасателей, сократить время ведения аварийно-спасательных работ.

Ключевые слова: угольная шахта; пожар; аварийно-спасательные работы; взрывоустойчивая перемычка; проемная труба; люк.

Постановка проблемы. Для изоляции аварийных участков и выработок применяют различные конструкции взрывоустойчивых перемычек. Многолетняя практика изоляции пожарных участков на шахтах, опасных по газу, подтвердила эффективность применения гидромеханического способа возведения взрывоустойчивых перемычек из растворов на основе гипсового вяжущего. Конструкция взрывоустойчивой перемычки предусматривает наличие проемной трубы с люком, который должен закрываться герметично [1, 2, 3].

Проемная труба – составная часть взрывоустойчивой перемычки, возводимой гидромеханическим способом, и техническое устройство, предназначенное для прохода людей в пункт коллективного спасения персонала, защиты от поражающих и (или) опасных факторов аварии в горных выработках, а также для проветривания пожарного участка во время его изоляции, удаления остаточных пожарных газов, проведения разведки и оценки результатов тушения пожара. Проемная труба состоит из нескольких промежуточных секций и головной секции с закрепленной на ней взрывозащитной крышкой люка.

Для повышения безопасности работ при возведении и эксплуатации взрывоустойчивых перемычек возникает необходимость открывания-закрывания люка проемной трубы дистанционно с помощью специального устройства. Актуальность работы обусловлена необходимостью создания устройства с упрощенной конструкцией, уменьшенной массой и металлоемкостью, удобного в эксплуатации для дистанционного закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемычках.

Цель работы – создать устройство для закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемычках, управляемое дистанционно.

Материал исследования. Для разработки выбрана схема управления устройством с пневматическим приводом исходя из ее достоинств: отсутствие необходимости внешнего источника энергии благодаря использованию пневмоаккумулятора (баллона), отсутствие необходимости применения мускульной силы горноспасателя, возможность подачи воздуха под высоким давлением на большие расстояния (рис. 1).

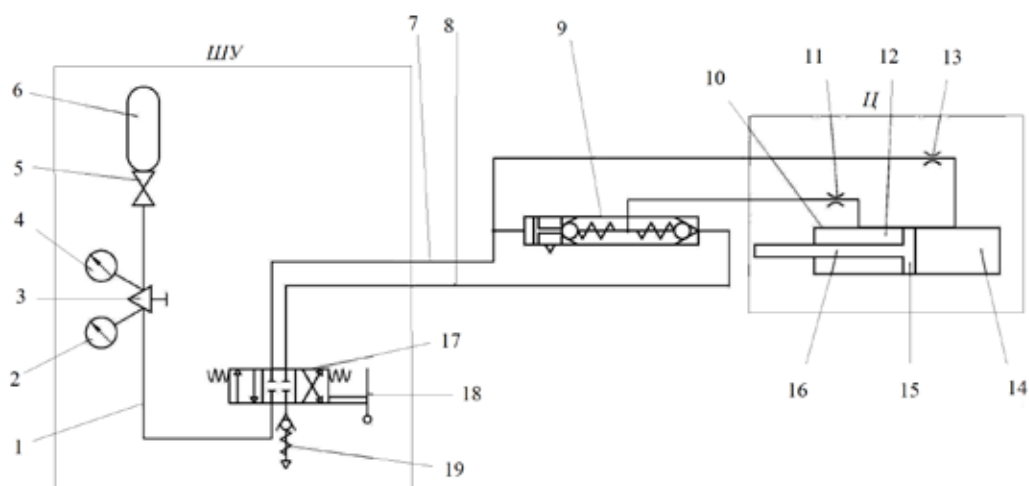


Рис. 1. Принципиальная схема управления устройством с пневматическим приводом:

- 1 – рукав; 2, 4 – манометры; 3 – баллонный редуктор; 5 – вентиль; 6 – баллон;
 7, 8 – пневмошланги; 9 – пневмозамок; 10 – корпус пневмоцилиндра двухстороннего действия; 11, 13 – дроссели; 12 – штоковая полость; 14 – поршневая полость;
 15 – поршень; 16 – шток; 17 – пневмораспределитель; 18 – рукоятка пневмораспределителя;
 19 – пневмоклапан обратный; ШУ – шкаф управления;
 Ц – пневмоцилиндр двухстороннего действия

Устройство состоит из шкафа управления, пневмоцилиндра двухстороннего действия, пневмозамка и комплекта пневмошлангов. Пневмоцилиндр с закрепленным на нем пневмозамком установлен в проемной трубе, шкаф управления находится за пределами проемной трубы на расстоянии не более 50 м и соединен с пневмоцилиндром пневмошлангами.

Шкаф управления содержит баллон с вентилем и баллонным редуктором с манометрами и пневмораспределитель с рукояткой и обратным

пневмоклапаном. Пневмоцилиндр состоит из дросселей, корпуса, поршня, соединенного со штоком, поршневой и штоковой полостей.

Баллон через вентиль, баллонный редуктор соединяется рукавом с пневмораспределителем. Для контроля давления в баллоне на баллонном редукторе установлен манометр. Для контроля рабочего давления в пневмосистеме устройства на баллонном редукторе размещен манометр.

Пневмораспределитель золотникового типа с помощью рукоятки пневмораспределителя переключают из нейтрального положения в положение ОТКР. или ЗАКР. При отпускании рукоятки под действием пружин золотник пневмораспределителя возвращает рукоятку пневмораспределителя в нейтральное положение. Обратный пневмоклапан служит для предотвращения попадания в пневмосистему устройства пыли и грязи извне.

Пневмораспределитель соединен пневмошлангами длиной 50 м через пневмозамок и дроссели с корпусом пневмоцилиндра. Корпус пневмоцилиндра соединен механизмом крепления с крышкой люка проемной трубы.

В рабочем положении крышка люка проемной трубы открывается в сторону. Пневмозамок служит для фиксации крышки люка в закрытом состоянии при сбросе давления в системе. Дроссели ограничивают скорость наполнения воздухом штоковой и поршневой полостей цилиндра и служат для регулирования скорости открывания-закрывания крышки люка проемной трубы (см. таблицу).

Основные технические характеристики разработанного устройства

Показатель	Значение показателя
Давление воздуха в пневмоцилиндре, МПа	1,2
Давление воздуха в баллоне, МПа, не более	16
Объем баллона, дм ³	4
Количество срабатываний от одного баллона, не менее	10
Длина каждого из пневмошлангов, м, не более	50
Максимальное усилие открывания-закрывания крышки люка, Н	2300/1500
Масса устройства (без учета массы пневмошлангов), кг	70
Максимальная длина хода штока пневмоцилиндра, мм	416
Внутренний диаметр пневмоцилиндра, мм	50
Диаметр штока пневмоцилиндра, мм	32

Опыт эксплуатации проемных труб показал, что крышку люка проемной трубы после инертизации или проветривания необходимо закрывать достаточно быстро. С другой стороны, в результате предварительных испытаний устройства установлено, что при резком открывании крышки люка возникает опасность деформации привода и кронштейна крепления пневмоцилиндра,

при быстром закрывании – опасность удара крышки о головную секцию люка. Оптимальное время открывания и закрывания крышки люка около 5 с. Возникла необходимость вычислить параметры дросселей, регулирующих скорость открывания-закрывания крышки люка проемной трубы (диаметры и длину сопел). Длина сопла дросселя

$$l = 3D,$$

где D – диаметр сопла дросселя при поправочном коэффициенте пропускной способности сопла $\mu = 0,6$ для цилиндрических отверстий.

Диаметр отверстия можно вычислить, зная расход воздуха через дроссель. Расход воздуха через дроссель определим по формуле Сен-Венана–Венцеля. Испытания показали, что при давлении воздуха в системе $p_1 = 1,2$ МПа шток цилиндра начинает движение при давлении в поршневой или штоковой полости $p_0 = 0,5$ МПа. Таким образом, соотношение давлений (в трубе до сужения p_1 , Па, и давления в среде, в которую истекает газ p_0 , Па) ниже критического:

$$\left(\frac{p_0}{p_1}\right)_{\text{кр}} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,521,$$

где k – показатель изоэнтропы;

$$k = c_p / c_v;$$

c_p – удельная теплоемкость при постоянном давлении; для воздуха

$$c_p = 29,12 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

c_v – удельная теплоемкость при постоянной температуре; для воздуха

$$c_v = 20,8 \text{ Дж} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{К}^{-1};$$

отсюда следует, что для воздуха

$$k = 1,4.$$

Поэтому для наших расчетов применима формула

$$G = \mu F_0 \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1} p_1 \rho_1}, \quad (1)$$

где G – массовый расход воздуха, кг/с;

μ – поправочный коэффициент пропускной способности сопла;

F_0 – площадь сечения сопла, м²;

ρ_1 – плотность воздуха; $\rho_1 = 1,2$ кг/м³.

С другой стороны [4],

$$G = q \rho_1,$$

$$Q = V_1 p_1 / t;$$

где Q – объемный расход, м³/с;

V_1 – объем поршневой полости; $V_1 = 8,17 \cdot 10^{-4}$ м³;

t – время заполнения поршневой полости воздухом и соответственно закрывания крышки люка проемной трубы; $t = 5$ с.

Диаметр сопла дросселя поршневой полости

$$D_1 = 2\sqrt{F_0 / \pi}.$$

Отсюда следует, что

$$D_1 = 2\sqrt{\rho_1 V_1 / \left[\mu \pi t \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} p_1 \rho_1 \right]}. \quad (2)$$

После вычислений по формуле (2) получаем

$$D_1 = 0,8 \text{ мм.}$$

Для штоковой полости объем $V_2 = 4,82 \cdot 10^{-4}$ м³.

Диаметр сопла дросселя штоковой полости

$$D_2 = 2\sqrt{\rho_1 V_2 / \left[\mu \pi t \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \sqrt{\frac{2k}{k+1}} p_1 \rho_1 \right]}. \quad (3)$$

После вычислений по формуле (3) получаем

$$D_2 = 0,6 \text{ мм.}$$

Последующие испытания показали, что параметры дросселей подобраны верно. Вид головного устройства и крепление пневмоцилиндра представлены ниже (рис. 2 и 3).



Рис. 2. Общий вид головного образца устройства



Рис. 3. Крепление пневмоцилиндра рабочего устройства на головной секции комплекта проемной трубы

Головной образец устройства прошел приемочные испытания в НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР и ОГВГСО МЧС ДНР с положительным результатом. Дистанционное управление осуществляли с расстояния 50 м.

Выводы

- Выполнен расчет параметров дросселей поршневой и штоковой полостей пневмоцилиндра устройства для дистанционного закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемычках. Испытания подтвердили правильность выбора расчетной схемы. Разработанное устройство позволило открывать и закрывать крышки люка проемной трубы дистанционно, что существенно увеличило безопасность ведения аварийно-спасательных работ в горных выработках. Упрощенная конструкция устройства с уменьшенными по сравнению с аналогами массой и металлоемкостью повысила надежность и удобство эксплуатации.

- Внедрение устройства для закрывания люков проемных труб во взрывоустойчивых перемычках, управляемого дистанционно, предполагают в подразделениях Государственной военизированной горноспасательной службы МЧС ДНР.

- Социальный эффект от внедрения состоит в повышении безопасности работы горноспасателей, сокращении времени ведения аварийно-спасательных работ.

Список литературы / References

1. Агеев, В.Г. Проблемы предотвращения и локализации метана в шахтах / В.Г. Агеев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2009. – Вып. 45. – С. 5 – 10.

Ageyev, V.G. *Problemy predotvrashcheniya i lokalizatsii metana v shakhtakh* [Problems of prevention and localization of methane in mines]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2009, issue 45, pp. 5 – 10.

2. 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 shakhtakh* [Explosion safety during sealing the fires in coal mines]. Donetsk, Arpi Publ., 2014, 338 p.

3. Смоланов, С.Н. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки / С.Н. Смоланов, В.И. Голинько, М.С. Мартиненко. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 261 с.

Smolantov, S.N., Golin'ko, V.I., Martinenko, M.S. *Izolyatsionnyye, ventilyatsionnyye i vzryvoustoychivyye peremychki* [Isolation, ventilation and explosion-resistant stoppings]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovaniye Publ., 2002, 261 p.

4. Гидравлика, гидромашины и гидроприводы / Т.М. Башта, С.С. Руднев, Б.Б. Некрасов и др. – 4-е изд. – М.: Альянс, 2010. – 423 с.

Bashta, T.M., Rudnev, S.S., Nekrasov, B.B. et al. *Gidravlika, gidromashiny i gidroprivody. 4-ye izd.* [Hydraulics, hydraulic machines and hydraulic actuators. The 4th ed.]. Moscow, Al'yans Publ., 2010, 423 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 30.09.2020

Vladislav Anatolyevich Chernyshev, Cand. Sci. (Tech.), scientific associate;

e-mail: osmas.niigd@gmail.com;

Eleonora Gennadiyevna Chaykovskaya, advanced engineer; e-mail: niigd.osmas-3@mail.ru;

Nikita Grigoryevich Zinchenko, engineer of the 1st category; e-mail: niigd.osmas-4@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) 332-78-36

A DEVICE FOR CLOSING HATCHES OF ENTRY PIPES REMOTELY IN EXPLOSION-RESISTANT STOPPINGS

Purpose. Calculation of parameters and development of the remotely controlled device for closing hatches of entry pipes in the explosion-resistant stoppings.

Methodology. Information investigations of the devices and analytical studies of constructions of the devices for closing hatches remotely, including the ones that operate in the explosive media.

Results. The parameters of the pneumatic cylinder have been calculated, and the device for closing hatches of entry pipes remotely in the explosion-resistant stoppings has been developed, the device brassboard has been manufactured, and its acceptance tests have been conducted.

Scientific novelty. The device for closing hatches of entry pipes remotely in the explosion-resistant stoppings has been suggested presenting the simplified design compared to analogs, the reduced mass and metal intensity which have increased reliability and operational convenience.

Practical value. Implementation of the remotely controlled device for closing hatches entry pipes in the explosion-resistant stoppings in subdivisions of the State Para-military Mine-rescue Service will make it possible to improve the safety of mine-rescuers' work and to reduce the duration of carrying-out the emergency and rescue operations.

Keywords: coal mine; fire; emergency and rescue operations; explosion-resistant stopping; entry pipe; hatch.

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 614.894.7:546.32-39

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора (по научной работе);

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

Любовь Алексеевна Зборщик, ст. науч. сотр.; e-mail: oszd_niigd_1@mail.ru;

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

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,

пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-45

Андрей Петрович Кирьян, зам. начальника; e-mail: andrei-kiryan@mail.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Академия гражданской защиты» МЧС ДНР

283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а. Тел. (+38 062) 303-27-01

РЕГЕНЕРАТИВНЫЙ ПРОЦЕСС В ИЗОЛИРУЮЩЕМ ДЫХАТЕЛЬНОМ АППАРАТЕ С ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМ КИСЛОРОДОМ

Цель. Исследовать параметры процессов регенерации воздуха в изолирующих дыхательных аппаратах с регенеративным продуктом на основе надпероксида калия.

Методика. Экспериментальные и теоретические методы исследований.

Результаты. Определены факторы, влияющие на скорость и характер процессов регенерации в изолирующих дыхательных аппаратах, для снижения спекания регенеративного продукта на основе надпероксида калия.

Научная новизна. Определены интенсивность теплосъема и влияние направления воздушного потока на скорость и характер процессов регенерации в изолирующих дыхательных аппаратах с регенеративным продуктом.

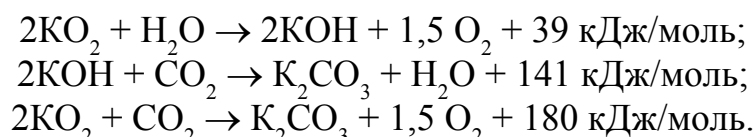
Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволят оптимизировать процессы регенерации, снизить массогабаритные характеристики дыхательного аппарата и улучшить условия дыхания.

Ключевые слова: *регенеративный процесс; надпероксид калия; водяные пары; диоксид углерода; гидроксид калия; карбонат калия; насыщенный раствор; теплоперенос; спекание.*

Постановка проблемы. Разработка современных моделей дыхательных аппаратов связана с поиском новых и усовершенствованием уже известных сорбентов диоксида углерода и регенеративных продуктов. Надпероксид калия, активно реагирующий с влагой и диоксидом углерода CO_2 с одновременным выделением кислорода и поглощением эквивалентного количества CO_2 , используется в регенеративных дыхательных аппаратах горноспасательных и пожарных команд длительное время. Однако возможность повышения эффективности использования регенеративного продукта на основе надпероксида калия далеко не исчерпана [1, 2]. Поэтому исследование процессов регенерации, перехода веществ из одного агрегатного состояния в другое, факторов, влияющих на протекание реакций массо- и теплообмена, – актуальная задача, решение

которой позволит снизить массогабаритные характеристики дыхательного аппарата и улучшить комфортность дыхания.

Анализ последних исследований. При протекании регенеративного процесса в изолирующих аппаратах с надпероксидом калия происходят химические реакции, связанные с поглощением из выдыхаемого человеком воздуха водяных паров и диоксида углерода CO_2 и образованием кислорода. Регенеративный процесс описывается следующими уравнениями основных химических реакций [3]:



Кроме указанных химических процессов происходят и физические процессы, связанные с массо- и теплообменом, плавлением и спеканием продуктов реакции, которые в настоящее время являются предметом всестороннего изучения.

Известно, что на регенеративный процесс оказывают влияние температура, соотношение диоксида углерода и влаги ($\text{CO}_2 : \text{H}_2\text{O}$) в газовой смеси, скорость газового потока и др.

Возможно протекание еще ряда второстепенных реакций, связанных с образованием следующих продуктов: кристаллогидратов, гидроксида калия KOH и карбоната калия K_2CO_3 .

Надпероксид калия отличается высоким коэффициентом регенерации. Отношение выделяемого кислорода к поглощенному CO_2 равно 1,5 [4, 5], что близко к оптимальному значению, определяемому дыхательным коэффициентом человека.

При взаимодействии KO_2 с водяными парами при температуре 19 °С и выше выделяется весь активный кислород с образованием гидроксида калия KOH и его гидратов, реакция протекает с уменьшением объема. Гидроксид калия KOH взаимодействует с CO_2 , и в зависимости от условий образуется карбонат калия K_2CO_3 или бикарбонат калия KHCO_3 . В реальных условиях использования KO_2 для регенерации воздуха, выдыхаемого человеком, реакция протекает в присутствии значительного количества влаги, соответствующего насыщению при температуре среды. Первичный акт – образование гидроксида калия, вторичный – образование карбоната калия. В определенных условиях, т.е. при температуре 20...100 °С (преимущественно при 60 °С), протекает реакция с образованием бикарбоната калия KHCO_3 .

В связи с тем, что в зоне реакции температура достигает 200...400 °С, кристаллогидраты и бикарбонат калия как термодинамически неустойчивые соединения разлагаются и не являются конечными продуктами регенеративного процесса. Ими будут гидроксид калия и карбонат калия.

Наряду с этими процессами в зоне реакции может также происходить термическое разложение KO_2 с образованием пероксида или даже оксида калия и выделением кислорода [3]. В литературе не приводятся данные о температуре начала и интенсивного разложения KO_2 в среде с большой массовой долей кислорода. Механизм разложения KO_2 сложен, особенно в условиях регенеративного процесса. Известно, что энергия активации реакции разложения KO_2 равна 239 кДж/моль.

В завершающей стадии регенеративного процесса в результате плавления эвтектик KOH , K_2CO_3 , KO_2 образуется жидкая фаза веществ, интенсивно поглощающая водяные пары и диоксид углерода. В результате протекающих при этом теплообменных процессов создаются условия, при которых наступает спекание отработанных продуктов реакций с образованием плотной когерентной массы.

Регенеративный процесс в гранулированном сорбенте в регенеративном патроне дыхательного аппарата имеет свои особенности, что требует исследования и обоснования.

Результаты исследований. Рассмотрен механизм поглощения водяных паров надпероксидом калия KO_2 в гранулированном сорбенте в регенеративном патроне. При взаимодействии надпероксида калия с водяными парами выдыхаемого воздуха в начале процесса на поверхности гранулы происходит гидролиз KO_2 с образованием гидроксида калия KOH и кислорода. Гранула регенеративного продукта покрывается пленкой насыщенного раствора KOH , который реагирует с CO_2 с образованием KHCO_3 на начальной стадии процесса или K_2CO_3 – на последующих стадиях. Так как относительная влажность выдыхаемого воздуха (98...100 %) выше гигроскопической точки карбоната калия (42 %), а молярное отношение $\text{H}_2\text{O} / \text{CO}_2 > 1$, то на поверхности карбоната калия в результате поглощения влаги образуется пленка насыщенного раствора карбоната калия – кристаллогидрат покрыт пленкой насыщенного раствора [6]. При таких условиях протекания хемосорбционных процессов скорость поглощения влаги выше скорости образования полутораводного кристаллогидрата.

При поглощении CO_2 раствором карбоната калия образуется бикарбонат, поверхностный слой перемещается вглубь гранулы. При протекании этих процессов движение влаги может происходить в виде пара или жидкости. В случае существования поверхностной пленки насыщенного раствора влага к последующим слоям KO_2 движется в виде жидкости. Поверхностный слой будет состоять из веществ $\text{KHCO}_3 / \text{K}_2\text{CO}_3 \cdot 1,5 \text{H}_2\text{O} / \text{K}_2\text{CO}_3 / \text{KOH}$.

Указанный механизм сорбции H_2O и CO_2 имеет место при температуре в зоне реакции до 100 °С, выше которой KHCO_3 разлагается на карбонат калия, воду и диоксид углерода. При температуре 138 °С полутораводный кристаллогидрат и другие гидраты не существуют, KHCO_3 разлагается в интервале температур 100...200 °С. Реакция протекает с нарастающей скоростью, которая проходит

через максимум и убывает до нуля. Энергия активации разложения KHCO_3 равна 45 кДж/моль.

После разложения кристаллогидратов и бикарбоната калия диоксид углерода CO_2 поглощается только КОН с образованием K_2CO_3 . Этот процесс в значительной степени зависит от диффузии H_2O и CO_2 в зону реакции, т.е. к гигроскопическому ядру KO_2 . При рассмотрении разреза отработанной гранулы регенеративного продукта установлено, что содержание K_2CO_3 / $\text{K}_2\text{CO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ уменьшается, а содержание КОН увеличивается. Поглощение воды значительно, и она не участвует в стехиометрическом превращении $\text{KO}_2 \rightarrow \text{KOH}$. Поэтому часто в уже «отработанном» регенеративном продукте содержится целое ядро, что объясняется приведенными выше причинами.

При протекании регенеративного процесса в результате химических реакций поглощения H_2O и CO_2 и образования кислорода в отработанном продукте накапливаются гидроксид калия и карбонат калия. Эти вещества образуют в присутствии неотработанного KO_2 эвтектические (плавящиеся при более низких температурах, чем исходные компоненты) смеси КОН, K_2CO_3 , KO_2 . Температура плавления КОН, K_2CO_3 и KO_2 соответственно 404, 891 и 535 °С. Эффективность поглощения CO_2 и интенсивность процесса спекания зависят от накопления в продукте наиболее легкоплавкого из перечисленных веществ, т.е. от КОН [7].

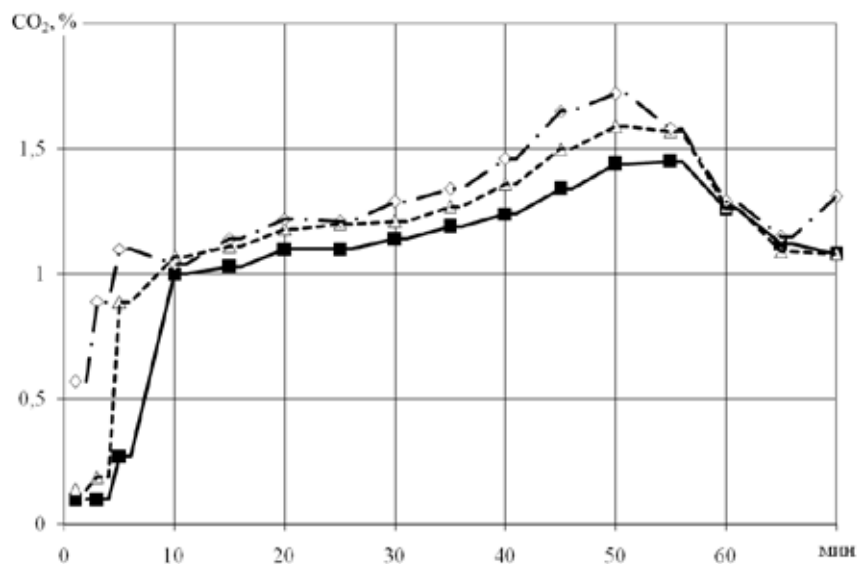
Образованию и накоплению КОН и, как следствие, быстрому образованию легкоплавких эвтектик благоприятствует увеличение количества влаги, содержащейся в газовой смеси, поступающей в регенеративный патрон. А при уменьшении влагосодержания в выдыхаемой газовой смеси скорость образования эвтектик уменьшается, что способствует увеличению активного периода работы дыхательного аппарата.

Таким образом, регулирование и поддержание необходимой абсолютной влажности выдыхаемого воздуха (например, при помощи кондиционирования) способствуют экономному расходованию кислорода и эффективному поглощению диоксида углерода CO_2 .

Следует отметить, что на разных этапах работы дыхательного аппарата исходя из необходимости обеспечения большей степени поглощения CO_2 требуется разное абсолютное влагосодержание воздуха, поступающего в регенеративный патрон. Так, в начале работы дыхательного аппарата кондиционирования выдыхаемого воздуха не требуется, так как скорость протекания хемосорбционных процессов на этой стадии регенеративного процесса тем больше, чем больше влаги поступает на регенеративный продукт. На последующих стадиях кондиционирование весьма желательно, и его возможно осуществлять физическими или химическими способами с применением гигроскопических материалов или веществ-осушителей.

Наряду с химическими процессами, связанными с поглощением H_2O и CO_2

и образованием кислорода, в регенеративном патроне протекают физические процессы, связанные с массо- и теплообменом. Последние оказывают значительное влияние на регенеративный процесс, ускоряя или замедляя его. Накопление тепла в патроне, с одной стороны, интенсифицирует протекание химических реакций, а с другой – способствует повышению температуры в регенеративном патроне, вызывая плавление вышеуказанных образующихся эвтектик продуктов реакций и исходных веществ с последующим их спеканием (см. рисунок). В зависимости от полноты и интенсивности этого спекания, а также от конструктивных особенностей регенеративного патрона, особенно его теплогазораспределителя, образуется конгломерат частиц различной плотности: от пористого до весьма плотного. Спекание с образованием плотной массы продукта вызывает значительное повышение сопротивления дыханию, вплоть до значений, физиологически непереносимых для пользователя и превышающих нормативное значение. Общее количество образовавшейся теплоты на 1 г KO_2 теоретически может достигать 1,55 кДж, что обуславливает повышение температуры в зоне реакции в регенеративном патроне самоспасателя до 400 °С. Поэтому для повышения комфортности дыхания в аппарате должны быть созданы такие условия протекания регенеративного процесса, при которых исключалось бы интенсивное спекание продуктов реакции. Основной способ добиться этого – изменение конструкции регенеративного патрона как главного конструктивного и функционального элемента респиратора.



Динамика содержания диоксида углерода в конце времени защитного действия самоспасателя с плавлением регенеративного продукта для трех экспериментальных исследований

Превалирующее влияние из всех конструктивных элементов патрона на процессы теплопереноса оказывает теплогазораспределитель – конструктивный

элемент, обеспечивающий разделение регенеративного продукта на отдельные секции, что препятствует образованию спекшихся агломератов и повышению сопротивления дыханию. Также теплогазораспределитель обеспечивает вынос теплоты из активной реакционной зоны и более равномерное ее распределение по массе регенеративного продукта. Из-за низкого коэффициента теплопроводности регенеративного продукта и воздушных каналов между его гранулами основной вклад в распределение теплоты в регенеративном патроне вносит именно теплогазораспределитель. Наиболее перспективно применение теплогазораспределителей (так же, как и теплообменников [8]) из материалов с высоким коэффициентом теплопроводности (медь, алюминий), тогда как применяемые в настоящее время теплогазораспределители из стали не обеспечивают максимально возможного теплопереноса.

При исследовании математических моделей регенеративного процесса в патроне респиратора (созданных при помощи методов математической физики и численного метода матричной прогонки для краевых задач со смешанными краевыми условиями в безразмерном виде) выявлены различия в протекании данных процессов в патроне с развернутой шихтой в зависимости от направления газовой воздушного потока. Исходя из этого установлено, что при прохождении в регенеративном патроне с развернутой шихтой газовой воздушного потока от периферии к центру возможно значительное уменьшение спекания регенеративного вещества и, как следствие, увеличение времени защитного действия регенеративного патрона аппарата с химически связанным кислородом.

Выводы. Для эффективного использования ресурса регенеративного продукта теоретически обоснованы необходимость увеличения времени плавления продуктов реакции и начало спекания только после полного израсходования запаса кислорода. Обеспечение таких условий протекания регенеративного процесса возможно кондиционированием воздуха, интенсификацией процессов теплопереноса из регенеративного патрона в окружающую среду, центростремительным направлением воздушного потока в регенеративном патроне.

Список литературы / References

1. Гудков, С.В. Современное состояние и перспективы развития отечественных шахтных самоспасателей. Часть 1. Сравнительный анализ изолирующих самоспасателей со сжатым и химически связанным кислородом / С.В. Гудков, И.А. Смирнов // Безопасность труда в промышленности. – 2013. – № 9. – С. 66 – 70.

Gudkov, S.V., Smirnov, I.A. *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya otechestvennykh shakhtnykh samospasateley. Chast' 1. Sravnitel'nyy analiz izoliruyushchikh samospasateley so szhatym i khimicheski svyazannym kislorodom* [Current state and prospects of development of the domestic mine self-rescuers.

Part 1. Comparative analysis of self-contained self-rescuers, compressed oxygen and chemical oxygen types]. *Bezopasnost' truda v prom-sti – Occupational safety in the industry*, 2013, no. 9, pp. 66 – 70.

2. Изолирующие дыхательные аппараты и основы их проектирования / С.В. Гудков, С.И. Дворецкий, С.Б. Путин, В.П. Тавров. – М.: Машиностроение, 2008. – 188 с.

Gudkov, S.V., Dvoretzkiy, S.I., Putin, S.B., Tavrov, V.P. *Izoliruyushchiye dykhatel'nyye apparaty i osnovy ikh proyektirovaniya* [Self-contained breathing apparatuses and their basic design]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2008, 188 p.

3. Диденко, Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ / Н.С. Диденко. – М.: Недра, 1990. – 160 с.

Didenko, N.S. *Regenerativnyye respiratory dlya gornospasatel'nykh rabot* [Regenerative breathing apparatuses for mine-rescue operations]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 160 p.

4. Регенеративный продукт и способ его получения: пат. 2210416 Рос. Федерация: МПК7 А 62 D 9/00.

Regenerativnyy produkt i sposob yego polucheniya [Regenerative product and method for its production]. Patent RF, no. 2210416.

5. Батырев, В.В. Основы индивидуальной защиты человека от опасных химических и радиоактивных веществ: науч.-метод. изд. / В.В. Батырев, Г.А. Живулин. – М.: ФГБУ ВНИИ ГО ЧС (ФЦ), 2016. – 204 с.

Batyrev, V.V., Zhivulin, G.A. *Osnovy individual'noy zashchity cheloveka ot opasnykh khimicheskikh i radioaktivnykh veshchestv: nauch.-metod. izd.* [Basic principles of human personal protection against hazardous chemical and radioactive substances: scientific and methodic publication]. Moscow, FGBU VNII GO ChS (FTs) Publ., 2016, 204 p.

6. Регенеративные продукты нового поколения: технология и аппаратурное оформление: монография / Н.Ф. Гладышев, Т.В. Гладышева, С.И. Дворецкий [и др.]. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 156 с.

Gladyshev, N.F., Gladysheva, T.V., Dvoretzkiy, S.I. et al. *Regenerativnyye produkty novogo pokoleniya: tekhnologiya i apparaturnoye oformleniye: monografiya* [New generation regenerative products: technology and hardware aspect: a monograph]. Moscow, Mashinostroyeniye-1 Publ., 2007, 156 p.

7. Ферапонтов, Ю.А. Синтез надперекиси калия / Ю.А. Ферапонтов, А.А. Гурьев, Д.В. Жданов [и др.] // Труды VIII региональной конференции «Проблемы химии и химической технологии». – Воронеж: ВГУ, 2000. – С. 340.

Ferapontov, Yu.A., Gur'yev, A.A., Zhdanov, D.V. et al. *Trudy VII regional'noy konferentsii "Problemy khimii i khimicheskoy tekhnologii"* [Proceedings of the 7th regional conference "Problems of chemistry and chemical technology"]. Voronezh, VGU Press, 2000, 340 p.

8. Гудков, С.В. Выбор рациональной конструкции регенеративного теплообменника для использования в системе автоматизированного

проектирования индивидуальных дыхательных аппаратов / С.В. Гудков, Е.Ю. Филатов, Е.Н. Туголуков [и др.] // Вопросы современной науки и практики. – 2006. – № 2(4). – С. 69 – 76.

Gudkov, S.V., Filatov, Ye.Yu., Tugolukov, Ye.N. et al. *Vybor ratsional'noy konstruktсии regenerativnogo teploobmennika dlya ispol'zovaniya v sisteme avtomatizirovannogo proyektirovaniya individual'nykh dykhatel'nykh apparatov* [Selection of rational design of the regenerative heat exchanger for application in the systems of computer-aided engineering of the personal breathing apparatuses]. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki – Problems of Contemporary Science and Practice*, 2006, no. 2(4), pp. 69 – 76.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 25.08.2020

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director on science;
e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Lyubov Alekseyevna Zborshchik, senior scientific associate; e-mail: oszd_niigd_1@mail.ru;

Ruslan Sergeyevich Pletenetskiy, scientific associate; e-mail: zoloto-russland@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) 332-78-45

Andrey Petrovich Kiryan, deputy commander; e-mail: andrei-kiryan@mail.ru

The State Educational Institution of Higher Occupational Education

“The Civil Defence Academy” of the EMERCOM of DPR

283050, Donetsk, 34a, ulitsa Rozy Luxemburg. Phone: (+38 062) 303-27-01

REGENERATION PROCESS IN A SELF-CONTAINED BREATHING APPARATUS, CHEMICAL OXYGEN TYPE

Purpose. To investigate the parameters of air regeneration processes in the self-contained breathing apparatuses with a regenerative product based on potassium superoxide.

Methodology. Experimental and theoretical methods of investigations.

Results. The factors affecting the velocity and nature of the regeneration processes in the self-contained breathing apparatuses have been determined for reducing the sintering of the regenerative product based on potassium superoxide.

Scientific novelty. The heat removal intensity and the influence of air flow direction on the velocity and nature of the regeneration processes in the self-contained breathing apparatuses with the regenerative product have been determined.

Practical value. The obtained investigation results will permit to optimize the regeneration processes, to reduce the mass-volume characteristics of the breathing apparatus and to improve the conditions for breathing.

Keywords: regeneration process; potassium superoxide; water vapor; carbon dioxide; potassium hydroxide; potassium carbonate; saturated solution; heat transfer; sintering.

УДК 622.457.2/.3

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

Николай Викторович Карнаух, канд. техн. наук, ст. науч. comp.; e-mail: avrstla@mail.ru;

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

Александр Викторович Мавроди, асп., ведущий инж.; e-mail: 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

ПРОВЕТРИВАНИЕ МАЛЫХ УГЛЕДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ ПРИ ВЕДЕНИИ АВАРИЙНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Цель. Обеспечение безопасности ведения аварийно-спасательных работ на малых угледобывающих предприятиях.

Методика. Анализ условий, способов и средств проветривания, ведения аварийно-спасательных работ, травматизма на малых угледобывающих предприятиях.

Результаты. Изучено состояние проветривания, условия, особенности, травматизм и другие проблемы на малых угледобывающих предприятиях, исследованы параметры вентиляторов местного проветривания, гибких вентиляционных труб диаметром до 600 мм. Разработаны предложения по выбору способов и средств проветривания малых угледобывающих предприятий при ведении аварийно-спасательных работ.

Научная новизна. Предложен системный подход к проветриванию малых угледобывающих предприятий и выбору мобильных средств вентиляции при ведении аварийно-спасательных работ.

Практическая значимость. Разработка предложений по выбору средств проветривания малых угледобывающих предприятий при ведении аварийно-спасательных работ, обеспечение безопасности горноспасателей.

Ключевые слова: *малые угледобывающие предприятия; условия, особенности и проблемы, способы и средства проветривания; аварии; травматизм; аварийно-спасательные работы; предложения по выбору средств проветривания при ведении аварийно-спасательных работ.*

Постановка проблемы. Безопасность ведения аварийно-спасательных работ на малых угледобывающих предприятиях связана с широким их распространением, расположением на значительном удалении от дорог и коммуникаций, малыми сечениями горных выработок, отсутствием проветривания, высоким травматизмом и другими факторами.

Анализ последних исследований. Проветривание малых угледобывающих предприятий при ведении аварийно-спасательных работ рассматривается впервые. Последние исследования относятся к разгазованию выработок в аварийных условиях шахт [1] и определению аэродинамических параметров вентиляционных трубопроводов, используемых для этого [2].

Цель исследований – выбор средств проветривания малых угледобывающих предприятий при ведении аварийно-спасательных работ подразделениями горноспасательной службы.

Материалы и результаты исследований. Малые угледобывающие предприятия характеризуются удаленным расположением от стационарных

источников энергии и транспортных коммуникаций, небольшой глубиной разработки, отработкой запасов в зоне газового выветривания пластов, малыми площадями (1,5...6 м²) поперечного сечения выработок, тупиковыми схемами проветривания с одним выходом на земную поверхность, отсутствием системы проветривания вообще, что становится основной причиной взрывов метана и асфиксии, практически полным разрушением имеющейся системы проветривания при авариях (взрывы, обрушения). В целом на 21 малом угледобывающем предприятии за анализируемые годы травмировано 37, из них погибло 24 человека, в том числе: при взрывах метана – девять травмировано и три смертельно, обрушениях – пять смертельно, от асфиксии – один травмирован и девять смертельно (табл. 1, рис. 1).

Рассмотренные условия и травматизм требуют выбора средств для проветривания малых угледобывающих предприятий, источников автономной энергии, способов оперативной их доставки к месту аварии, обеспечения безопасности горноспасателей.

Проветривание малых угледобывающих предприятий при ведении аварийно-спасательных работ нагнетательным способом с применением вентиляторов местного проветривания (далее – ВМП) и гибких вентиляционных трубопроводов малого диаметра наиболее эффективно и безопасно [1, 2].

Таблица 1

Травматизм и аварии на малых угледобывающих предприятиях

Предприятие, физическое лицо – предприниматель (ФЛП)	Дата	Вид аварии	Травми- ровано	Из них смер- тельно
ФЛП «Шевелев А.Г.»	26.02.16	Обрушение	1	1
ООО «Лемма плюс»	15.09.16	Возгорание метана	2	–
ФЛП «Юркин В.С.»	02.07.17	Падение из волокуши	2	1
ФЛП «Куликов А.В.»	29.08.17	Асфиксия	1	1
ФЛП «Шеховцев А.В.»	08.10.17	«	2	1
ООО «Шахтерская промышленная группа»	11.10.17	Взрыв	5	3
ФЛП «Дуб А.В.»	16.11.17	Падение в ствол	1	1
ООО «Точка»	04.12.17	Обрушение	1	1
ФЛП «Кузнецов В.Р.»	05.12.17	Асфиксия	1	1
ФЛП «Оглода Э.Б.»	09.12.17	Опрокидывание волокуши	2	2
ФЛП «Сагайдачный»	14.12.17	Взрыв	3	–

Предприятие, физическое лицо – предприниматель (ФЛП)	Дата	Вид аварии	Травми- ровано	Из них смер- тельно
ФЛП «Кочнов Игорь Александрович»	31.01.18	Обрушение	1	1
ФЛП «Родионов»	16.02.18	Падение в ствол	1	1
ООО «СВ Трифон»	03.07.18	Обрушение	1	1
ООО «Тополь»	01.08.18	Взрыв	2	–
ФЛП «Суховерхов И.В.»	09.08.18	Отравление оксидом углерода	2	2
ООО «Горизонт»	11.08.18	Прорыв воды	2	2
ФЛП «Василенко А.Н.»	06.06.19	Асфиксия	2	2
ФЛП «Сашенков В.П.»	26.07.19	«	2	2
ФЛП «Курневич А.А.»	30.07.19	Повышенная температура	2	–
ФЛП «Филимонов Д.А.»	02.11.19	Обрушение	1	1
ИТОГО			37	24

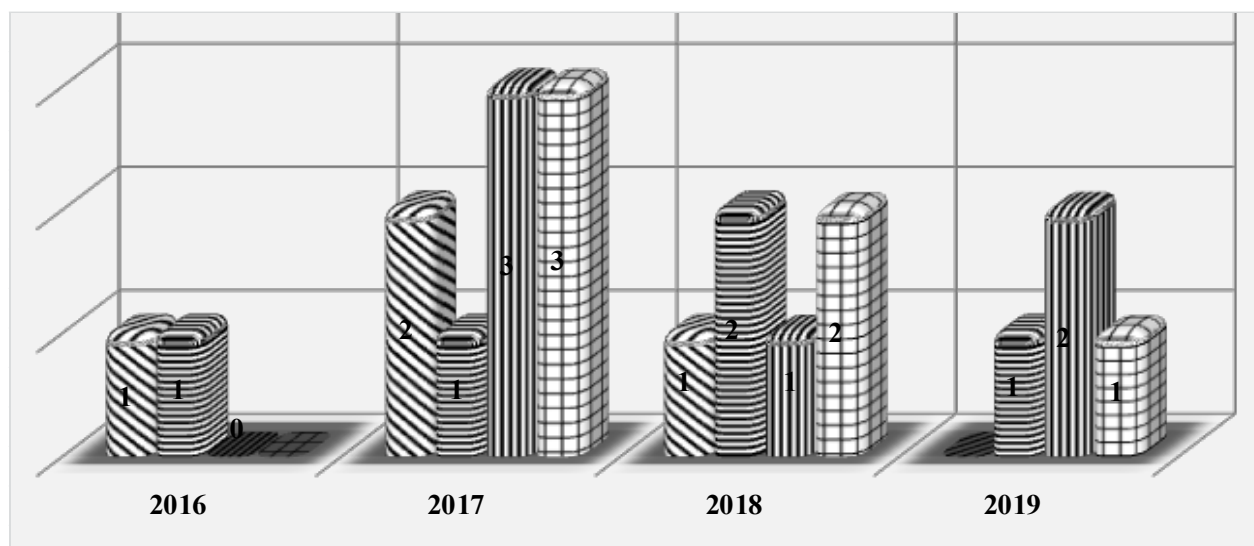


Рис. 1. Аварийность на малых угледобывающих предприятиях:

 – вспышка метана (взрыв);
  – обрушение;
  – асфиксия;
  – прочие

Проанализированы основные технические параметры (диаметр рабочего колеса, скорость его вращения, подача воздуха и создаваемое давление, мощность двигателя и его КПД, габариты и масса) электрических и пневматических ВМП (табл. 2, 3).

Таблица 2

Технические параметры пневматических ВМП

Параметр	Значение параметра для ВМП				
	ВКМ-200А	ВМП-3М	ВМП-4	ВМП-5М	ВМП-6М
Выходной диаметр патрубка, мм	200	300	400	500	600
Подача, м ³ /мин	18...35	25...100	45...160	80...280	120...480
КПД	0,19	0,24	0,26	0,30	0,35
Давление, даПа	108...40	118...40	215...40	196...50	285...60
Мощность на валу, кВт	0,7	2,0	5,0	9,0	24,0
Расход сжатого воздуха, м ³ /мин	1,2	3,0	5,0	8,0	20,0
Масса, кг	10	50	70	175	277

Таблица 3

Технические параметры электрических ВМП

Параметр	Значение параметра для ВМП				
	СВМ-4М	ВМ-200	ВМ-4М	ВМ-5М	ВМ-6М
Рабочее колесо:					
• диаметр, мм	400	550	400	500	600
• частота вращения, мин ⁻¹	2880	2850	2900	2940	2950
Подача, м ³ /мин	55...135	120...225	50...155	100...380	140...480
Давление, даПа	100...40	125...35	145...70	240...60	340...75
Максимальная мощность, кВт	2,2	6,7	3,8	13,0	22,5
Максимальный КПД	0,59	0,57	0,72	0,75	0,76
Габариты, мм:					
• длина	510	805	740	935	1050
• ширина	555	635	550	650	730
• высота	565	704	560	670	750
Масса, кг	88	200	140	250	350

Выполнены расчеты необходимого расхода воздуха для проветривания малых угледобывающих предприятий при ведении аварийно-спасательных работ по основным факторам (выделению метана или диоксида углерода, минимальной скорости движения воздуха в основной выработке

и максимальному количеству работающих в забое горнорабочих и горноспасателей), и принят максимальный из расчетных.

Расход воздуха в забое при расчете по: людям (5 чел.) 30,0 м³/мин, минимальной скорости при площади сечения выработки 6 м² 54,0 м³/мин и выделению метана (0,5 м³/мин) 50,0 м³/мин (принят максимальный).

Фактическую подачу свежего воздуха в забой определяют по аэродинамическим характеристикам ВМП и трубопровода (рис. 2).

Фактическая подача свежего воздуха в забой при работе ВМП на одно сопло 63,5 м³/мин, на два сопла 75,0 м³/мин, на три сопла 93,0 м³/мин с достаточным резервом.

Значения аэродинамического сопротивления при расчетах следующие: для поворота трубопровода на 90° эквивалентная длина трубопровода 20 м, а для поворота на 45° – 10 м.

Аэродинамическое сопротивление гибкого вентиляционного трубопровода $R_{тр}$, даПа·с²/м⁶, определяют по формуле

$$R_{тр} = r_{тр} (l_{тр} + 20d_{тр}n_1 + 10d_{тр}n_2), \quad (1)$$

где $r_{тр}$ – удельное аэродинамическое сопротивление гибкого вентиляционного трубопровода, даПа·с²/м⁷;

$l_{тр}$ – длина трубопровода, м;

$d_{тр}$ – диаметр трубопровода, м;

n_1 и n_2 – количество поворотов трубопровода на 90 и 45°.

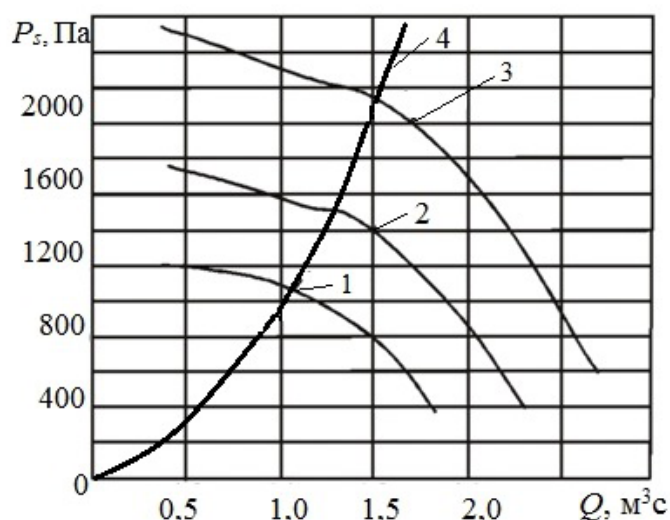


Рис. 2. Аэродинамическая характеристика ВМП-4 при давлении сжатого воздуха 0,5 МПа с вентиляционным трубопроводом диаметром 400 мм:

Q – подача ВМП; P_s – статическое давление;

1, 2, 3 – аэродинамические характеристики ВМП-4 при работе одного, двух и трех сопел;

4 – аэродинамическая характеристика трубопровода диаметром 400 мм

Коэффициент утечек воздуха $k_{\text{ут.тр}}$ зависит от типа и материала трубы, длины звеньев, расхода воздуха, наличия швов и их качества.

Для трубопроводов диаметром 400 мм коэффициент утечек воздуха $k_{\text{ут.тр}}$ определяют по формуле

$$k_{\text{ут.тр}} = 1 + 1,78 \cdot 10^{-6} d_{\text{тр}}^2 l_{\text{тр}}^2 Q_{\text{з.п}}, \quad (2)$$

где $d_{\text{тр}}$ – диаметр трубопровода, м;

$l_{\text{тр}}$ – длина трубопровода, м;

$Q_{\text{з.п}}$ – расчетный расход воздуха в забое, м³/мин.

Аэродинамическое сопротивление трубопровода диаметром 200 мм в 12 раз больше, чем трубопровода диаметром 400 мм, и в 30 раз больше, чем трубопровода диаметром 600 мм. Поэтому гибкие трубопроводы диаметром 200 и 300 мм имеют огромное аэродинамическое сопротивление и не пригодны для обеспечения проветривания при ведении аварийно-спасательных работ.

ВМП-4 снабжен коробкой с тремя соплами и трехходовым краном, обеспечивающим подачу сжатого воздуха к одному, двум и трем соплам, у него три режима проветривания с переключением на ходу с одной характеристики на другую, что обеспечивает плавный пуск ВМП без разрушения трубопровода.

Наиболее приемлемые источники энергии для ведения аварийно-спасательных работ – дизель-генераторы или компрессоры на автомобильных прицепах или шасси с широким диапазоном параметров, которые обеспечивают автономное энергопитание на удаленных объектах (малых угледобывающих предприятиях) при отключении стационарного питания от центральных сетей в результате аварии. При выборе дизель-генераторов и компрессоров обязательно следует учитывать потребляемую мощность других потребителей энергии.

В аварийных ситуациях и при разгазовании выработок следует использовать нагнетательный способ проветривания как наиболее рациональный, эффективный и безопасный, а также гибкие вентиляционные трубы. Трубы необходимо иметь как можно меньшего диаметра и более легкие, чтобы ускорить их установку при ведении аварийно-спасательных работ. Аэродинамическое сопротивление гибких труб в значительной степени зависит от материала и диаметра, качества монтажа, натяжения трубопровода, его провисания и других причин. Чем меньше диаметр трубопровода, тем больше его аэродинамическое сопротивление. Для учета степени натяжения гибких труб табличное значение аэродинамического сопротивления умножают на коэффициент натяжения, равный 1,25 для слабо натянутых труб.

В связи с относительно малой массой (70 кг) и габаритами для обеспечения мобильности предложено использовать и размещать на автотранспорте ВМП-4, комплект вентиляционных труб, запасные части и приспособления (рис. 3). Основным источником питания для ВМП-4 могут быть автономные винтовые компрессоры ЗИФ-55 [3].

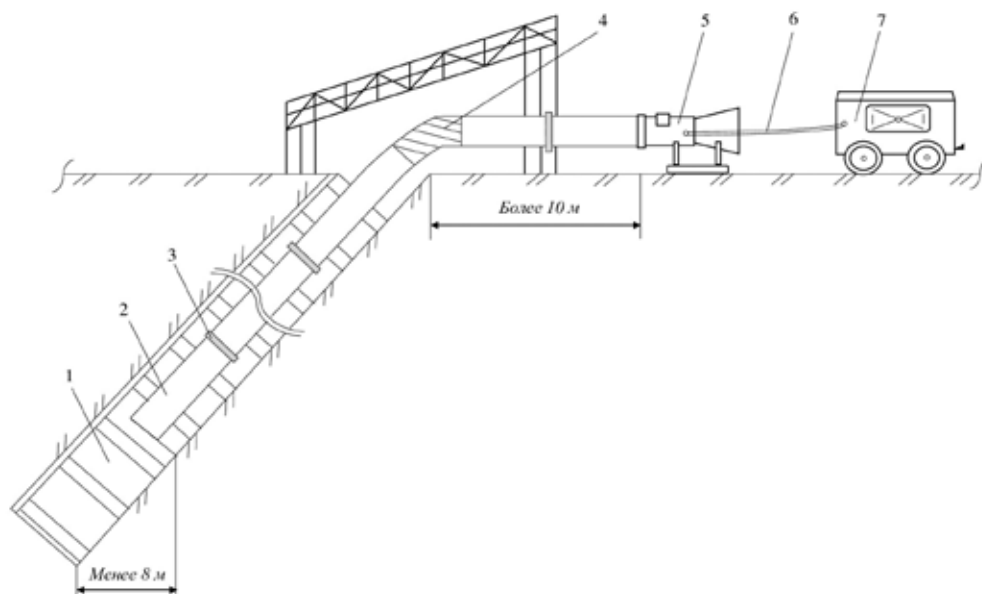


Рис. 3. Схема компоновки технических средств для проветривания малых угледобывающих предприятий при ведении аварийно-спасательных работ:

1 – горная выработка; 2 – вентиляционный трубопровод; 3 – соединение отрезков вентиляционного трубопровода; 4 – металлическое соединительное колено; 5 – пневматический или электрический ВМП; 6 – рукав для подачи сжатого воздуха или электрический кабель; 7 – источник пневматической или электрической энергии

Технические характеристики дизель-генераторов АД-200-Т400 позволяют использовать их как источник питания для электрических вентиляторов ВМ-4 или ВМ-4М при ведении аварийно-спасательных работ.

Выводы. Для достижения основной цели – обеспечения безопасности ведения аварийно-спасательных работ – можно эффективно использовать ВМП, гибкие вентиляционные трубопроводы, компрессоры и дизель-генераторы. Мобильны и удобны для обеспечения безопасности ведения аварийно-спасательных работ и проветривания ВМП с пневматическим или электрическим приводом, работающие на нагнетание, с трубами диаметром 400...600 мм. Увеличения давления вентиляторов и длины проветриваемой выработки можно достигнуть за счет соединения двух вентиляторов для последовательной работы на один трубопровод.

Список литературы / References

1. Агеев, В.Г. Разгазирование тупиковых выработок в аварийных условиях / В.Г. Агеев // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2008. – № 45. – С. 5 – 9.

Ageyev, V.G. Razgazirovaniye tupikovykh vyrabotok v avariynykh usloviyakh [Degassing of blind drifts in emergency conditions]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2008, issue 45, pp. 5 – 9.

2. Козаков, С.П. Определение механических и аэродинамических параметров шахтных вентиляционных трубопроводов / С.П. Козаков, Б.А. Гриценко, К.Х. Ли // Безопасность труда в пром-ти. – 2013. – № 11. – С. 52 – 53.

Kozakov, S.P., Gritsenko, B.A., Li, K.Kh. *Opredeleniye mekhanicheskikh i aerodinamicheskikh parametrov shakhtnykh ventilyatsionnykh truboprovodov* [Determination of mechanical and aerodynamic parameters of mine ventilation ducts]. *Bezopasnost' truda v prom-sti – Occupational safety in industry*, 2013, no. 11, pp. 52 – 53.

3. Компрессоры ЗИФ-55. URL: <http://www.alfatechno.ru/?id=67&cat=138> (дата обращения: 25.08.2020).

Kompressory ЗИФ-55 [Elektronnyy resurs] [The ЗИФ-55 compressors] (Electronic resource). Available at: <http://www.alfatechno.ru/?id=67&cat=138> (accessed: 25.08.2020).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 25.08.2020

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

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

Aleksandr Vladislavovich Agarkov, post-graduate, engineer of the 1st category;

e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru;

Aleksandr Viktorovich Mavrodi, post-graduate, advanced engineer; e-mail: 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)332-78-36, 332-78-34

VENTILATION OF SMALL COAL MINING ENTERPRISES DURING CARRYING-OUT EMERGENCY AND RESCUE OPERATIONS

Purpose. Ensuring the safety of emergency and rescue operations at the small coal mining enterprises.

Methodology. Analysis of conditions, methods and means of ventilation, conduction of the emergency and rescue operations, work-related injuries at the small mining enterprises.

Results. The state of ventilation, conditions, peculiarities, injury rate and other problems of the small coal mining enterprises have been studied, the parameters of booster fans, flexible air pipes with diameter up to 600 mm have been investigated. The propositions regarding the selection of methods and means of ventilation of the small coal mining enterprises during carrying-out the emergency and rescue operations have been elaborated.

Scientific novelty. The system approach to ventilation of the small coal mining enterprises and selection of portable ventilation means during carrying-out the emergency and rescue operations has been proposed.

Practical value. Elaboration of propositions regarding the selection of ventilation means of the small coal mining enterprises during carrying-out the emergency and rescue operations, ensuring the safety of the mine-rescuers.

Keywords: *small coal mining enterprises; conditions, specifics and problems, methods and means of ventilation; accidents; work-related injuries; emergency and rescue operations; propositions for selection of ventilation means.*

УДК 614.841.245

Владелен Валерьевич Гуржий, ст. науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru;

Александр Андреевич Березин, инж.; e-mail: fire408@mail.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-80

Сергей Валентинович Искрук, нач. отд-ния; e-mail: ipldnr@mail.ru

Испытательная пожарная лаборатория Республиканского спасательного центра МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 071) 394-45-70

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ АТЛАСА ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРИЗНАКОВ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

Цель. Обосновать практическую значимость Атласа в обучении специалистов, занимающихся изъятием фрагментов электроустановок с места пожара и установлением причины пожара.

Методы. Анализ научно-технической литературы и обобщение опыта инструментальных исследований фрагментов электросети, изъятых с места пожара.

Практическая значимость. Результаты работы позволяют оценить значимость справочного пособия в рамках внедрения современных методов инструментальных исследований.

Научная новизна. Атлас позволяет существенно дополнить существующие методики по определению признаков аварийных режимов работы электроустановок.

Ключевые слова: методические рекомендации; аварийные режимы работы; инструментальные исследования, атлас; электрооборудование.

Постановка задачи. По статистическим данным [4], наблюдается тенденция роста количества пожаров, причины возникновения которых – нарушения правил устройства и эксплуатации электроустановок (см. таблицу).

Доля пожаров по причинам нарушения правил устройства и эксплуатации электроустановок

	Период, год		
	2015	2016	2017
Количество пожаров, ед.	4898	5513	8553
Доля пожаров по электротехническим причинам, %	24,1	27,2	29,3

Причинно-следственная связь между аварийными режимами работы электроустановок и возникновением пожара определяется на основании комплексного исследования объектов и вещественных доказательств, изъятых с места пожара. Один из этапов комплексного исследования – анализ

фрагментов электроустановок на наличие признаков аварийных режимов работы, образовавшихся до или вследствие пожара.

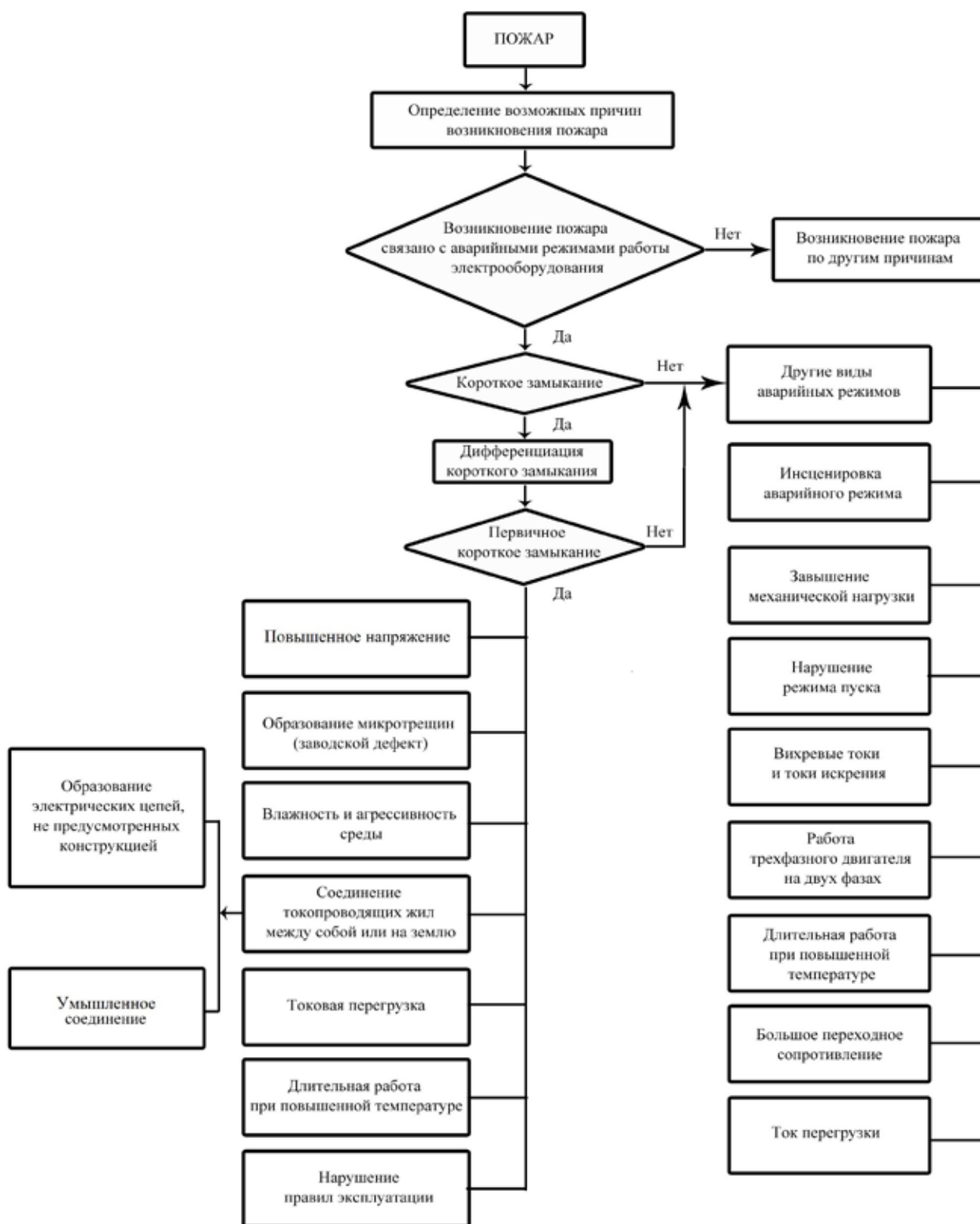
Необходимость инструментальных исследований вызвана пожарной опасностью аварийных режимов, возникающих во время работы электроустановок, сопровождающейся тепловыми эффектами, которые могут стать причиной воспламенения горючих веществ и материалов.

Согласно [2, 3] можно выделить три основных пожароопасных аварийных режима работы электроустановок:

- короткое замыкание (первичное или вторичное);
- ток перегрузки;
- большое переходное сопротивление (искровой и безыскровой режимы).

Системный анализ заключений, составленных районными структурными подразделениями, по расследованию причин пожаров свидетельствует о том, что в некоторых случаях технические заключения о причине пожара составляются без проведения инструментальных исследований фрагментов электроустановок со следами теплового воздействия, изъятых с места пожара. Таким образом, подобные заключения о причине пожара могут лишь с малой долей вероятности указывать на причастность аварийных режимов работы электроустановок к возникновению пожара, что, в свою очередь, может вызвать вопрос о полноте и объективности составленного заключения. Это вызвано тем, что аварийные режимы работы, создавшиеся до или вследствие пожара, имеют различные признаки, которые можно определить только при помощи проведения инструментальных исследований на специальном оборудовании.

Как известно, пожар может стать причиной серьезного материального ущерба, причинения вреда здоровью и жизни людей. Поэтому после окончания работ по тушению пожара проводят мероприятия в целях получения информации для установления места возникновения пожара и последующей проверки версий его возникновения. Пожар может быть следствием небрежного обращения с огнем, несоблюдения правил пожарной безопасности, злого умысла, направленного на уничтожение следов преступления, и т.д. По результатам заключения о причине пожара дознаватель (следователь) выносит постановление об отказе или возбуждении уголовного дела. Современные инструментальные исследования позволяют повысить вероятность получения правдивой и всесторонне отработанной версии причины пожара, а самое главное – установить причинно-следственную связь между причиной пожара и ответственностью конкретного лица. Таким образом, проведение исследований изменений свойств материалов вследствие внутреннего или внешнего теплового воздействия – необходимый этап установления причастности аварийных режимов работы электроустановок к возникновению пожара.



Структурная схема причинно-следственной связи между аварийным режимом работы и возникновением пожара

В служебной деятельности специалистов известны случаи, когда с места пожара изымались фрагменты электроустановок, не имеющие признаков аварийных режимов работы, что влекло за собой неоправданную трату

времени специалистов, занимающихся определением момента возникновения аварийного режима работы. Часто признаки пайки, сварки, воздействия высокой температуры и механического воздействия могут быть приняты за признаки аварийных режимов работы. Поэтому и возникла необходимость наглядной демонстрации признаков аварийных режимов работы электроустановок или их отсутствия специалистам органов дознания, занимающимся изъятием фрагментов и не знакомым с характерными признаками аварийных режимов работы электроустановок.

В литературных источниках, посвященных исследованиям причин возникновения пожаров, отсутствуют справочные пособия, в которых были бы представлены цветные иллюстрации с оптическим увеличением характерных признаков аварийных режимов работы электрооборудования и дано их описание.

Цель работы – раскрыть практическую значимость Атласа по определению признаков аварийных режимов электрооборудования (далее – Атлас) для обучения и служебной деятельности специалистов, занимающихся изъятием фрагментов электроустановок с места пожара и установлением причин пожара.

Изложение основного материала. На основании накопленного специалистами НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР и Испытательной пожарной лаборатории РСЦ МЧС ДНР опыта инструментальных исследований фрагментов электрооборудования, изъятых с места пожара, анализа научно-технической литературы, методических рекомендаций НИИГД «Респиратор» по определению вида короткого замыкания и условий его возникновения и признаков большого переходного сопротивления разработан Атлас – иллюстрированное цветное справочное издание, в котором представлены изображения с различным оптическим увеличением характерных признаков аварийных режимов работы электроустановок и их описание.

Оплавления фрагментов электроустановок могут иметь различную геометрическую форму и структуру, характер этих оплавлений зависит от многих условий и причин возникновения, особенностей подключения электрооборудования к электросети и т.д.

Атлас – вспомогательное пособие для анализа микроструктур оплавлений фрагментов электроустановок, изъятых с места пожара, в котором удалось структурировать типовые оплавления, характерные для тех или иных аварийных режимов работы, и описать их характерные признаки. Заключение о причинах возникновения пожаров вследствие аварийных режимов работы электроустановок составляют специалисты Испытательной пожарной лаборатории РСЦ МЧС ДНР на основании инструментальных методов исследований, которые проводят совместно НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР и Испытательная пожарная лаборатория РСЦ МЧС ДНР.

Это справочное пособие наглядно демонстрирует характерные признаки

аварийных режимов, что позволяет специалисту (дознавателю) закрепить и углубить теоретические знания, а следовательно, повысить качество проведения инструментальных исследований, определить причинно-следственную связь между моментом возникновения аварийного режима работы электрооборудования и возникновением пожара.

Атлас содержит описание физических процессов протекания аварийных режимов работы электроустановок, причин их возникновения и основных признаков оплавлений фрагментов электроустановок.

Затруднения при выявлении и анализе признаков аварийных режимов работы (как показывает опыт инструментальных исследований) возникают при наличии оплавлений или механических повреждений фрагментов электроустановок, не связанных с аварийными режимами работы, к которым относятся: контактные соединения жил проводов при помощи пайки или сварки, исходные структуры поверхностей жил проводов, воздействие высокой температуры, механические повреждения и т.д. Описание оплавлений, не являющихся признаками аварийных режимов работы, приведены в разделе «Признаки отсутствия аварийных режимов работы в электросети на образцах, изъятых с места пожара».

Иллюстрированная часть Атласа представляет собой цветные изображения микроструктур оплавлений, зафиксированных при помощи микроскопа с программным обеспечением с различной кратностью увеличения, характеризующие признаки:

- короткого замыкания (первичного или вторичного);
- большого переходного сопротивления;
- тока перегрузки;
- совокупных признаков аварийных режимов;
- отсутствия аварийных режимов.

Выявление указанных признаков при инструментальных исследованиях требует системного подхода. При анализе характера оплавлений образцов, изъятых с места пожара, учитывают все совокупные признаки аварийных режимов на всех фрагментах образцов, так как только при системном подходе можно достоверно определить или исключить взаимосвязь и момент возникновения аварийных режимов работы.

Характерные признаки аварийных режимов работы, представленные в Атласе, не являются эталонными, так как условия их возникновения могут существенно отличаться друг от друга и зависят от температуры окружающей среды, состава атмосферы, термического воздействия аварийного режима и т.д., но в то же время они дают визуальное представление о различных признаках аварийных режимов работы в электроустановках.

Выводы

- Практическое применение Атласа предполагает наличие объема специальных знаний по определению изменения свойств материалов

вследствие внутреннего или внешнего теплового воздействия.

• При рассмотрении значимости Атласа установлено, что описание и рисунки, иллюстрирующие поверхности фрагментов электрооборудования, изъятых с места пожара, на которых зафиксированы характерные признаки аварийных режимов работы, существенно дополняют методические рекомендации, что позволяет повысить эффективность обучения специалистов, занимающихся изъятием фрагментов электроустановок с места пожара и выявлением признаков аварийных режимов работы, а следовательно, качество проведения инструментальных исследований.

Список литературы / References

1. Атлас по определению признаков аварийных режимов работы электрооборудования: утв. МЧС ДНР 18.10.2018. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2018. – 154 с.

Atlas po opredeleniyu priznakov avariynykh rezhimov raboty elektrooborudovaniya: utv. MChS DNR 18.10.2018 g. [The Atlas for determination of indicators of emergency states of the electric equipment operation: approved by the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters on October 18, 2018]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2018, 154 p.

2. Методические рекомендации по определению вида короткого замыкания: утв. МЧС ДНР 05.11.2015. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2016. – 29 с.

Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu vida korotkogo zamykaniya: utv. MChS DNR 05.11.2015 g. [Methodological guidelines for determination of the short circuit type: approved by the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters on November 15, 2015]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2016, 29 p.

3. Методические рекомендации по определению признаков большого переходного сопротивления и температуры нагрева электроустановок: утв. МЧС ДНР 14.03.2016. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2016. – 32 с.

Metodicheskiye rekomendatsii po opredeleniyu priznakov bol'shogo perekhodnogo soprotivleniya i temperatury nagreva elektroustanovok: utv. MChS DNR 14.03.2016 g. [Methodological guidelines for determining the indicators of the high transition resistance and of the heating temperature of electrical installations: approved by the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters on March 14, 2016]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2016, 32 p.

4. Официальный сайт МЧС ДНР [Электронный ресурс]. URL: <http://dnmchs.ru/> (дата обращения: 31.09.2020).

Ofitsial'nyy sait MChS DNR [Elektronnyy resurs]. [The Official site of the Ministry

of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters] [Electronic resource]. Available at: <http://dnmchs.ru/> (accessed: 31.09.2020).

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 13.10.2020*

Vladelen Valeryevich Gurzhiy, senior scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

Aleksandr Andreyevich Berezin, engineer; e-mail: fire408@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) 332-78-80

Sergey Valentinovich Iskruk, head of department; e-mail: ipldnr@mail.ru

The Fire Investigation Laboratory of the Republican Rescue Centre of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 071) 394-45-70

PRACTICAL VALUE OF THE ATLAS FOR DETERMINATION OF INDICATORS OF EMERGENCY STATES OF THE ELECTRIC EQUIPMENT OPERATION

Purpose. To substantiate the practical value of the Atlas in training of the specialists engaging in extraction of fragments of the electric equipment from a place of fire and in investigation of a cause of fire.

Methods. Analysis of the scientific and technical literature and generalization lessons learned of the instrumental surveys of electric grid fragments extracted from the place of fire.

Practical value. The results of the work make it possible to evaluate the reference book value within the framework of implementing the modern methods of instrumental surveys.

Scientific novelty. The Atlas permits to enlarge remarkably the existing methodologies for determining the indicators of emergency states of the electric installations operation.

Keywords: *methodical guidelines; emergency states of operation; instrumental surveys.*

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. Рекомендуются, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Рисунки (диаграммы, фото и др.) располагаются вместе с текстом в местах ссылок на них. Подписи к рисункам должны содержать нумерацию в порядке размещения в тексте и объяснительную подпись. Недопустимо включать подписи в сам рисунок.

Формулы в статьях должны быть набраны с помощью редактора формул (внутренний редактор формул в редакторе Microsoft Word for Windows или Microsoft Equation), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом. Нумерация формул, на которые есть ссылка в тексте, – справа в скобках. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы – в книжной ориентации, они должны иметь тематические заглавия и номера, фон таблицы другим цветом не выделяют. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не более 15 источников с датой их издания не ранее чем за 10 лет и количеством самоссылок до 20 %) приводится в порядке упоминания в тексте.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Ответственность за содержание статьи несет автор. Предоставленные материалы не возвращаются.

Статьи, которые не отвечают требованиям редакции, не рассматриваются.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2020, № 4(57)

На русском и английском языках

Редактор Л.В. Барзий

Переводчик Л.А. Ахундова

Верстальщик Н.Н. Грибенюк

Учредитель и издатель

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

Поступившие на издание статьи проходят рецензирование

Подписано к использованию 17.11.2020.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 139,2 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 17 ноября 2020 г.