



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИ «РЕСПИРАТОР»

№ 1(60)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИ «Респиратор». – Донецк, 2023. – № 1(60). – 118 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	В.В. Мамаев – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	С.П. Греков
д-р техн. наук	С.Е. Гулько
д-р техн. наук	А.Ф. Долженков
д-р техн. наук	С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь)
д-р техн. наук	В.А. Канин
д-р техн. наук	А.П. Ковалев
д-р техн. наук	К.Н. Лабинский
д-р техн. наук	Д.Ю. Палеев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	Г.П. Стариков
д-р мед. наук	В.В. Черкесов
д-р хим. наук	В.В. Шаповалов

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

Подписан к печати по рекомендации Ученого совета ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» (протокол № 1 от 27.02.2023).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000264 от 09.08.2022.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NII “RESPIRATOR”

No. 1(60)

Published quarterly

Founded in 1970

Scientific bulletin of the NII "Respirator". – Donetsk, 2023. – No. 1(60). – 118 p.

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

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

Founder and publisher – State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator" of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters".

Editorial board:

Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	V.V. Mamayev – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Grekov
Dr. Sci. (Tech.)	S.Ye. Gulko
Dr. Sci. (Tech.)	A.F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A.P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	D.Yu. Paleyev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
Dr. Sci. (Med.)	V.V. Cherkesov
Dr. Sci. (Chem.)	V.V. Shapovalov

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

Approved for printing according to the reference of the Academic council of GBU NII "Respirator" EMERCOM DPR (proceeding no. 1 from 27.02.2023).

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

Registration certificate of the network publication AAA no. 000264 from 09.08.2022.

СОДЕРЖАНИЕ***I. Пожарная и промышленная
безопасность*****Греков С. П.**Влияние концентрации кислорода
на кинетику хемосорбции
газонасыщенных углей

7

**Симонов А. М., Карнаух Н. В.,
Агарков Ал. В.**Системы разработки и схемы
проветривания выемочных участков
при отработке выбросоопасных
пластов

13

Старикова И. Г.Метод определения времени
самонагревания угольного пласта

25

**Калякин С. А., Головченко Е. А.,
Белокобыльский М. А.**Зависимость температуры
воспламенения угольной пыли
от выхода летучих веществ

35

***II. Безопасность в чрезвычайных
ситуациях*****Ковалев А. П., Колесник Л. И.**Расчет надежности
и пожаробезопасности сложных
по структуре восстанавливаемых
в процессе эксплуатации систем

43

**Мамаев В. В., Зборщик Л. А.,
Плетенецкий Р. С., Францев В. И.**Современные требования к пунктам
переключения в резервные шахтные
самоспасатели

55

TABLE OF CONTENTS***I. Fire and industrial safety*****Grekov S. P.**Influence of oxygen concentration
on gas-saturated coal chemisorption
kinetics**Simonov A. M., Karnaukh N. V.,
Agarkov Al. V.**Mining systems and ventilation schemes
of working areas during extraction
of outburst-prone seams**Starikova I. G.**Method of determination of coal seam
spontaneous heating period**Kalyakin S. A., Golovchenko Ye. A.,
Belokobylskiy M. A.**Dependence of coal dust combustion
temperature on volatile substances
emission***II. Safety in emergencies*****Kovalyov A. P., Kolesnik L. I.**Calculation of dependability and fire
safety of structurally complex restorable
in process of operation systems**Mamayev V. V., Zborshchik L. A.,
Pletenetskiy R. S., Frantsev V. I.**Modern requirements for mine change-
over stations

Черкесов В. В.

Профессиональный риск спасателя МЧС.
Роль медико-психологических факторов
готовности и адаптации к риску

63

Cherkesov V. V.

Occupational risk of EMERCOM rescuer.
Influence of medical and psychological
factors of readiness and adaptation to risk

Добрякова Е. И., Булатников А. А.

Обоснование необходимого количества
пожарно-спасательных подразделений

70

Dobryakova Ye. I., Bulatnikov A. A.

Substantiation of calculation of required
number of fire-and-rescue subdivisions

***III. Охрана труда
и экологическая безопасность***

**Пефтибай Г. И., Галухин Н. А.,
Ивахненко А. В.**

Обоснование выбора номенклатуры
средств механизации
горноспасательных работ
на примере средств забора воды

79

**Peftibay G. I., Galukhin N. A.,
Ivakhnenko A. V.**

Substantiation for selection a set of mine-
rescue engineer equipment exemplified
by water drafting tools

Лебедева В. В.

Количественные параметры
вспучивания огнезащитного покрытия
на основе хлоропренового каучука

90

Lebedeva V. V.

Quantitative parameters of intumescence
of chloroprene rubber-based
flame-retardant coating

**Головченко Е. А., Момот Д. И.,
Карасёва В. В.**

Апробация метода идентификации
видов сгорающих веществ
при подземных пожарах

98

**Golovchenko Ye. A., Momot D. I.,
Karasyova V. V.**

Testing of method for identification
of combustible substances types
in underground fires

Иваненко А. Ф., Мухин П. Е.

Оценка экологического риска при
ликвидации и консервации угольных
шахт ДНР

106

Ivanenko A. F., Mukhin P. Ye.

Environmental risk assessment during
liquidation and conservation of coal mines
of the DPR

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 622.822.225:001.891.572

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

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

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

ВЛИЯНИЕ КОНЦЕНТРАЦИИ КИСЛОРОДА НА КИНЕТИКУ ХЕМОСОРБЦИИ ГАЗОНАСЫЩЕННЫХ УГЛЕЙ

Цель. Разработать аналитический метод построения кинетических кривых адсорбции и химического реагирования кислорода разной концентрации с газонасыщенными углями на основе ранее проведенных экспериментов для предотвращения самонагрева угля.

Методы. Теоретические исследования неизотермической адсорбции веществ микропористыми адсорбентами на основе уравнения мономолекулярной адсорбции Ленгмюра и математическое моделирование этого процесса с использованием экспериментальных данных, хроматографический метод.

Результаты. Предложен метод построения кинетических кривых адсорбции кислорода различной концентрации газонасыщенными углями. На примере угля высокой степени метаморфизма установлена зависимость количества кислорода, поглощенного и вступившего в химическую реакцию, от его концентрации в адсорбтиве.

Научная новизна. Впервые предложен аналитический метод определения кинетики адсорбции кислорода углями при их низкотемпературном окислении с учетом разной концентрации окислителя в шахтном воздухе.

Практическое значение. Определение концентрации адсорбированного и прореагировавшего с углем кислорода позволит оценить количество выделяемой при этом теплоты и контролировать температуру самонагрева твердого топлива.

Ключевые слова: адсорбция; химическая реакция; концентрация; температура; низкотемпературное окисление; уголь.

Постановка проблемы. Известно, что кинетика процесса гетерогенной адсорбции компонентов зависит от свойств адсорбента и адсорбтива. Результаты исследования поглощения кислорода газонасыщенными углями Донецкого бассейна приведены в ряде работ [1 – 3], определены их основные физико-химические свойства, влияющие на изменение температуры и связанные с количеством произошедших эндогенных пожаров.

Окислительную способность углей определяли с помощью хроматографического метода при концентрации кислорода в адсорбтиве 21 %. Эксперименты показали, что скорость сорбции кислорода углями и его средняя объемная доля в адсорбтиве находятся в прямой зависимости, характерной для угля определенной стадии метаморфизма. Однако быстротечность экспериментов несоизмерима с продолжительностью низкотемпературного

окисления углей в шахтных условиях, длящегося от одной недели (при газодинамических явлениях) до 30...40 дней. Кроме того, в горной выработке установлена разная концентрация кислорода, что может влиять на его адсорбцию и развитие процесса самовозгорания угля [4].

Поэтому **цель исследования** – разработать аналитический метод построения кинетических кривых адсорбции и химического реагирования кислорода разной концентрации газонасыщенными углями на основе ранее проведенных экспериментов для предотвращения самонагревания угля.

Результаты исследования. В работе [4] представлены результаты экспериментальных и теоретических исследований кинетики адсорбции кислорода газонасыщенными углями и предложен метод определения общего количества поглощенного кислорода и вступившего в химическую реакцию.

В условиях шахт концентрация кислорода в местах скопления угля (возможных источниках эндогенных пожаров) может быть значительно ниже за счет разбавления его метаном, выделяющимся из скопления и окружающих его пород. Как показали натурные исследования [2], концентрация кислорода в шахтном воздухе может изменяться от 21 до 2...3 %, при этом продолжается процесс низкотемпературного окисления с выделением теплоты. В связи с этим возникла необходимость разработки метода построения кинетических кривых поглощения и хемосорбции кислорода углем при более низких его концентрациях и обобщения данных для различных марок твердого топлива.

Метод позволяет определить максимально возможное количество поглощенного кислорода, учитывая только свойства адсорбента и концентрацию окислителя в адсорбтиве. Иными словами, полагаем, что значения концентрации поглощенного и прореагировавшего с углем кислорода, полученные при начальной его концентрации 27 моль/м³, максимальны.

Для решения поставленной задачи воспользуемся уравнением Ленгмюра, когда степень заполнения поверхности адсорбента адсорбтивом можно выразить через отношение количества адсорбированного вещества a , моль/м³, к его предельной адсорбционной способности $a_{\max}$, моль/м³, при равновесном давлении P .

Уравнение изотермы адсорбции Ленгмюра имеет вид [3]

$$a = \frac{a_{\max} b P}{(1 + b P)}, \quad (1)$$

где b – коэффициент адсорбции, зависящий от энергии адсорбции и температуры и характерный для каждого типа угля, м³/моль.

Учитывая, что парциальное давление кислорода в воздухе прямо пропорционально концентрации, вместо выражения (1) можно записать

$$a = a_{\max} \frac{bC_{O_2}}{1 + bC_{O_2}}, \quad (2)$$

где C_{O_2} – концентрация адсорбтива, моль/м³.

Примем, что для любой концентрации кислорода, меньшей 27 моль/м³, величина $a_{\max} = \text{const}$ и характерна для каждой марки угля. Используя уже изученные изотермы адсорбции для угля с долей летучих веществ V^{daf} 8...43 %, найдем значение b в разный период времени τ , с, при $C_{O_2} < 27$ моль/м³ по формуле

$$b = \frac{a}{C_{O_2} (a_{\max} - a)}. \quad (3)$$

Имея $b = f(\tau)$ и $a_{\max} = f(V^{\text{daf}})$, установим новые значения концентрации кислорода, поглощенного углем и вступившего с ним в химическую реакцию с выделением теплоты, при разной C_{O_2} в адсорбтиве. Для последующего обобщения и анализа примем несколько значений дискретной величины, а именно: $C_{O_2} = 9,36$ моль/м³ (21 %); 4,46 моль/м³ (5 %); 2,23 моль/м³ (2,5 %).

На примере адсорбции кислорода углем шахты им. С.М. Кирова [4] рассмотрим метод расчета кинетических кривых поглощения адсорбтива разной концентрации. Определим значения b по формуле (3), принимая $a_{\max} = 48$ моль/м³ и $C_{O_2} = 27,01$ моль/м³ (см. табл.).

Таблица

Результаты определения коэффициента адсорбции b

τ , ч/с	12/43200	24/86400	48/172800	72/259200	120/432000
$a_{\text{эксп}}$, моль/м ³	39,59	41,25	45,7	47,07	47,46
b , м ³ /моль	0,106	0,227	0,742	1,922	2,657

Используя полученные значения, установим динамику поглощения кислорода разной концентрации поверхностью угля с долей летучих веществ 9,14 % (рис. 1).

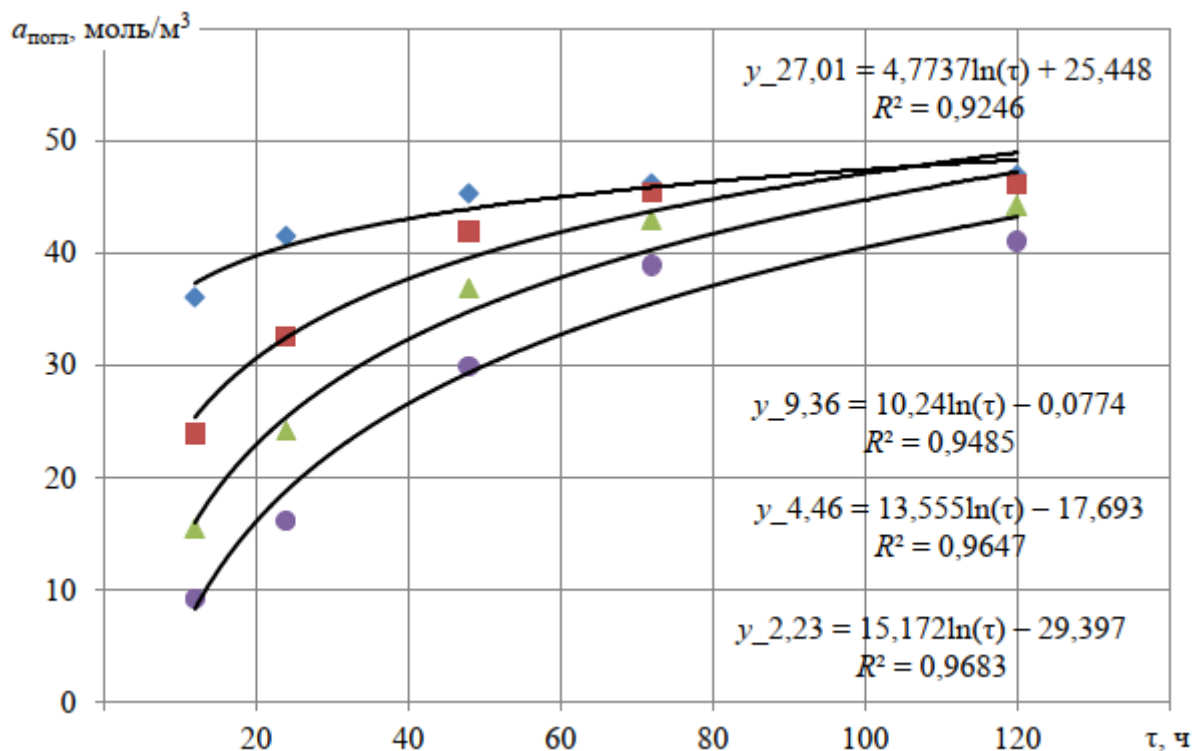


Рис. 1. Динамика поглощения углем кислорода

при его начальной концентрации CO_2 :

♦ – 27,01 моль/м³; ■ – 9,36 моль/м³; ▲ – 4,46 моль/м³; ● – 2,23 моль/м³

Анализ полученных зависимостей показывает, что максимальное значение поглощенного кислорода почти не зависит от его начальной концентрации в адсорбтиве. Однако с уменьшением CO_2 можем наблюдать граничные области применения уравнения изотермы адсорбции Ленгмюра. Например, при $\text{CO}_2 = 2,23$ моль/м³ в течение первых суток количество поглощенного вещества практически прямо пропорционально концентрации кислорода возле поверхности угля. Через 5 сут протекания адсорбции ее величина стремится к пределу, при котором она уже практически не зависит от концентрации, а в промежуточной области величина адсорбции описывается уравнением (2). Таким образом, используя модель Ленгмюра, можно оценить процесс заполнения адсорбционных центров на твердой поверхности угля при разной концентрации кислорода в потоке воздуха, омывающего твердые частицы.

Полученные кинетические кривые адсорбции кислорода углем и аналитическое решение задачи хемосорбции [4] позволили определить количество прореагировавшего кислорода $a_{\text{хим}}$, моль/м³ (рис. 2).

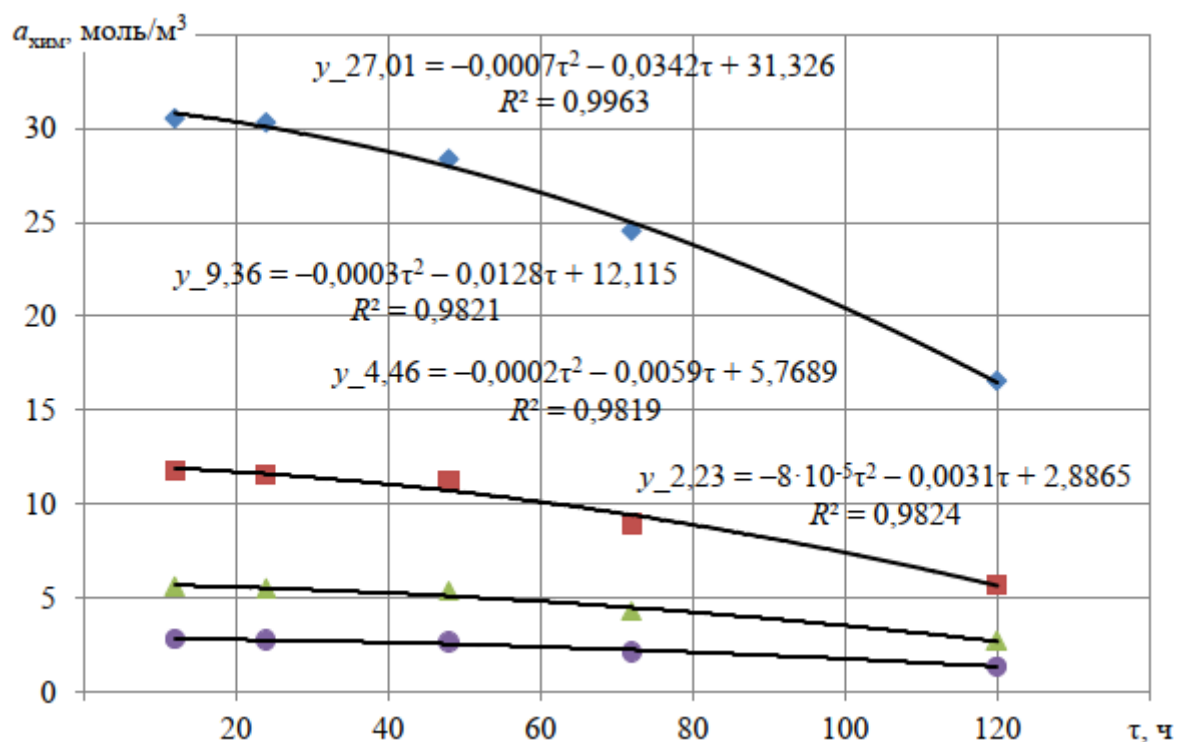


Рис. 2. Динамика хемосорбированного углем кислорода

при его начальной концентрации CO_2 :

◆ – 27,01 моль/м³; ■ – 9,36 моль/м³; ▲ – 4,46 моль/м³; ● – 2,23 моль/м³

Динамика концентрации кислорода, хемосорбированного углем, при разных значениях CO_2 с высокой достоверностью описана полиномиальной зависимостью и показывает постепенное замедление реакции. Представленные результаты не противоречат установившимся представлениям о протекании адсорбции на активированных центрах, количество которых уменьшается по мере их заполнения молекулами адсорбтива.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Впервые предложен аналитический метод построения кинетических кривых и химического реагирования кислорода с газонасыщенными углями при низкотемпературном окислении. Установлена динамика адсорбции кислорода в процессе его хемосорбции углем высокой стадии метаморфизма, что позволит оценить изменение температуры самонагрева твердого топлива.

Список литературы / References

1. Пашковский, П. С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П. С. Пашковский. – Донецк : Ноулидж (Донецкое отделение), 2013. – 792 с.
Pashkovskiy P. S. *Endogennyye pozhary v ugolnykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ. (Donetsk branch), 2013, 792 p. (In Russian)

2. 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. *Aktualnyye voprosy borby s samovozgoraniyem uglya* [Actual problems of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p. (In Russian)

3. Карнаухова, А. П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов / А. П. Карнаухова. – Новосибирск : Наука. Сиб. предприятие РАН, 1999. – 470 с.

Karnaukhov A. P. *Adsorbtsiya. Tekstura dispersnykh i poristyykh materialov* [Adsorption. Texture of dispersed and porous materials]. Novosibirsk, Nauka. Sib. predpriyatie RAN Publ., 1999, 470 p. (In Russian)

4. Греков, С. П. Параметры низкотемпературного окисления угля разной степени метаморфизма / С. П. Греков, В. П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2022. – № 3(59). – С. 7 – 17.

Grekov S. P., Orlikova V. P. *Parametry nizkotemperaturnogo okisleniya uglya raznoy stepeni metamorfizma* [Parameters of low-temperature oxidation of coal with different grades of metamorphism]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*: *nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*. Donetsk, 2022, no. 3(59), pp. 7-17. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. Г. Агеевым

Дата поступления рукописи 14.10.2022

Дата опубликования 17.03.2023

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

State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"

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

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-79-07

INFLUENCE OF OXYGEN CONCENTRATION ON GAS-SATURATED COAL CHEMISORPTION KINETICS

Purpose. To develop an analytical method for plotting the kinetic curves of adsorption and chemical reaction of various concentrations of oxygen with gas-saturated coal based on the previously conducted experiments for preventing the spontaneous heating of coal.

Methods. Theoretical studies of non-isothermal adsorption of substances by microporous adsorbents based on the Langmuir monomolecular adsorption equation, the mathematical modeling of this process applying the experimental data as well as the chromatography.

Results. The method for plotting the kinetic curves of adsorption of various concentrations of oxygen by the gas-saturated coal has been proposed. Using the coal of a high degree of metamorphism as an example the dependence between the amount of oxygen absorbed and entered into the chemical reaction and its concentration in the adsorptive has been established.

Scientific novelty. The novel analytical method for determination of the kinetics of oxygen adsorption by coal during its low-temperature oxidation has been proposed factoring in the different concentrations of the oxidizing agent in the mine air.

Practical value. The determination of the concentration of oxygen adsorbed and reacted with coal will make it possible to estimate the amount of heat released during it and to control the temperature of spontaneous heating of the solid fuel.

Keywords: *adsorption; chemical reaction; concentration; temperature; low-temperature oxidation; coal.*

УДК 622.457.36:622.831.322*Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: simonov54_54@mail.ru;**Николай Викторович Карнаух, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: avrstla@mail.ru;**Александр Владиславович Агарков, вед. инж.; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru**Государственное бюджетное учреждение**«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»**283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-34*

СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ И СХЕМЫ ПРОВЕТРИВАНИЯ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ ПРИ ОТРАБОТКЕ ВЫБРОСООПАСНЫХ ПЛАСТОВ

Цель. Выбор систем разработки и схем проветривания при отработке выбросоопасных пластов для снижения газовыделения на выемочных участках шахт.

Методы. Использован аналитический метод исследования.

Результаты. Установлено, что на безопасность ведения горных работ при отработке выбросоопасных пластов, количество и интенсивность внезапных выбросов влияют горнотехнические факторы, сложные горно-геологические условия и системы разработки выемочных участков. Охарактеризованы основные требования к схемам проветривания участков при разработке газообильных выбросоопасных пластов.

Научная новизна. Научно обосновано применение прогрессивных систем разработки и схем проветривания выемочных участков шахт при отработке выбросоопасных угольных пластов с обособленным разбавлением вредностей по источникам их выделения и наличием двух горных выработок со свежей струей воздуха, примыкающих к очистному забою, для обеспечения безопасности и создания комфортных условий труда шахтеров, повышения максимальной нагрузки на очистной забой по газовому фактору, исключения образования местных и слоевых скоплений метана на сопряжении забоя с вентиляционным штреком и в нем, снижения газообильности и температуры воздуха в лаве.

Практическая значимость. Разработаны схемы выемочных участков с различными системами разработки, схемами проветривания, зонами выбросов и безопасными зонами. Обосновано, что прямоточные схемы проветривания с подачей к лаве свежего воздуха по горным выработкам, обеспечивающие два запасных выхода людей в выработки со свежей струей воздуха из зоны выброса и полное обособленное разбавление вредностей (газ, пыль, тепло), – наиболее безопасные и эффективные, что рекомендовано учитывать в процессе проектирования новых полей, блоков и выемочных участков.

Ключевые слова: угольная шахта; выемочный участок; системы разработки; схемы проветривания; выбросоопасные пласты угля; безопасность шахтеров.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Ведение работ в шахтах нарушает естественно сформированное равновесие горных пород и пластов угля в процессе образования толщи и приводит к изменению горного давления и напряженно-деформированного состояния массива, образованию зон разгрузки, а также к изменению свойств и характеристик пластов угля и пород в местах ведения горных работ. Это влечет за собой раскрытие природных

и образование новых эксплуатационных трещин, что приводит к возникновению внезапных выбросов [1].

За последние 20 лет внезапные выбросы угля, породы и газа происходили в условиях шахт Донбасса: имени А. Ф. Засядько, имени А. А. Скочинского, «Холодная Балка», «Щегловская-Глубокая», № 22 «Коммунарская», «Ждановская» и др. При этом на шахте имени А. А. Скочинского за время строительства и эксплуатации произошло более 5000 выбросов, по приблизительным данным, травмировано 100 шахтеров [2 – 3].

Внезапные выбросы – один из наиболее опасных видов аварий на шахтах, в результате которых горнодобывающие предприятия несут существенные убытки, при этом нарушается проветривание сети выработок, в них формируются взрывоопасные концентрации газов и непригодная для дыхания шахтная среда [4 – 6].

Анализ последних исследований и публикаций. На основании ранее проведенных исследований [7, 8] и проанализированных литературных данных [1, 2, 4 – 6, 9] установлено, что на безопасность ведения работ при отработке выбросоопасных пластов, количество и интенсивность внезапных выбросов влияние оказывают сложные горно-геологические, горнотехнические условия и системы разработки выемочных участков шахт.

Исследование схем проветривания выемочных участков при отработке пластов, опасных по газодинамическим явлениям, показало, что, как правило, применяют возвратноточные схемы проветривания с последовательным разбавлением вредностей (типа 1В–Н–в–вт) и поступлением исходящей струи воздуха из подготовительных забоев, при этом работы ведут в опережающих нишах или подготовительных забоях на участке.

Применение таких схем обусловлено, как правило, необходимостью оперативного ввода новых очистных забоев в работу. Однако при этом снижается безопасность из-за отсутствия возможности оперативного выхода шахтеров в выработки со свежей струей воздуха при авариях, наличия потенциально опасных зон по возникновению выбросов, а также из-за проблем с местными скоплениями метана у охранных сооружений участковых выработок (бутовых полос) и окон в них.

Схемы проветривания участков с последовательным разбавлением вредностей в основном применяют при отработке невыбросоопасных пластов и при условии, что нагрузка на очистной забой не ограничивается одним из основных факторов – газовым. Соответственно, актуальное направление исследований и **цель настоящей статьи** – выбор систем разработки и схем проветривания выемочных участков шахт при отработке выбросоопасных пластов для снижения газовыделения на выемочных участках.

Результаты исследований. Обобщая результаты исследований по выбору и применению на шахтах схем проветривания участков при отработке

выбросоопасных и газообильных пластов, первоочередное значение должны иметь следующие требования и факторы:

- обратный порядок отработки участков (по столбовой системе);
- минимизация потенциально возможных зон (мест) возникновения выбросов в условиях участка;
- минимизация количества шахтеров, осуществляющих работы в наиболее опасных зонах (по выбросам);
- безопасный и наиболее короткий выход шахтеров в участковые выработки со свежей воздушной струей;
- разгруженные от горного давления и дегазированные краевые участки обрабатываемого пласта;
- отсутствие выноса (концентрированного) метана из выработанного пространства участка;
- рассредоточение выноса метана в вентиляционный штрек вслед за лавой;
- эффективная дегазация сближенных угольных пластов и выработанного пространства участка;
- обеспечение необходимых мер безопасности при ведении горноспасательных работ после выбросов.

Как показывают исследования [7, 8], наиболее опасна сплошная система разработки с проведением тупиковых выработок, опережающих очистной забой, и ниш (рис. 1), а также с последовательным разбавлением вредностей (газ, пыль и тепло из подготовительной выработки и транспортируемой горной массы). Соответственно, она практически не отвечает ни одному из перечисленных выше требований.

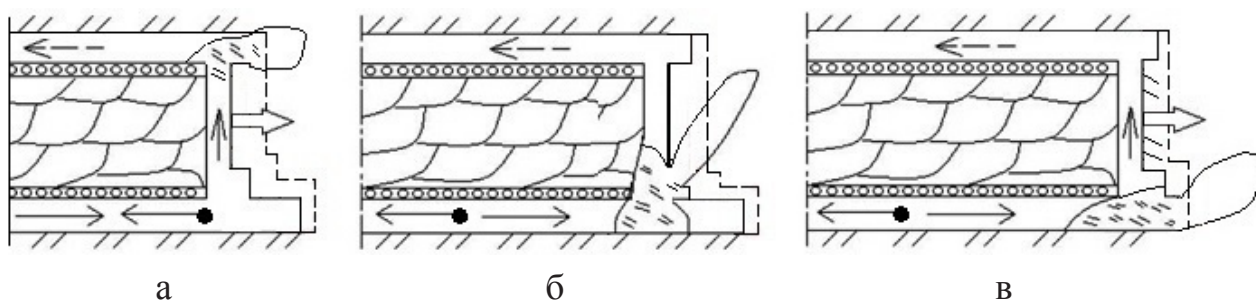


Рис. 1. Возвратноточная схема проветривания выемочного участка с последовательным разбавлением вредностей (типа 1В–Н–в–вт) и зонами выбросов:

а – при выбросе в верхней нише; б – при выбросе в нижней части очистного забоя или нижней нише; в – при выбросе в опережающей тупиковой выработке

Внезапные выбросы при применении схем типа 1В–Н–в–вт происходят в верхней нише (рис. 1, а), нижней нише и нижней части лавы (рис. 1, б), в опережающей тупиковой выработке (рис. 1, в). Пунктиром показаны наиболее потенциально опасные зоны внезапных выбросов.

При выбросе угля и породы, как правило, поперечное сечение очистного забоя полностью или частично перекрывается выброшенной горной массой и нарушается проветривание участка за счет общешахтной депрессии [7, 8].

Столбовые системы разработки обеспечивают отсутствие тупиковых выработок на участке и, следовательно, уменьшение количества опасных мест (зон), сокращение числа работающих людей в опасных зонах, предварительную в процессе их подготовки и отработки разгрузку и дегазацию краевых участков выработок за счет дегазации естественного типа.

Как известно, образование разгрузочной зоны впереди лавы происходит за счет опережающего горного давления с разрушением сплошности массива и «перетеканием» метана в выработанное пространство участка, что зачастую резко сокращает количество внезапных выбросов и, соответственно, возможный травматизм шахтеров [5]. Столбовая система разработки с восходящим проветриванием выемочного участка и безопасными зонами представлена на рис. 2.

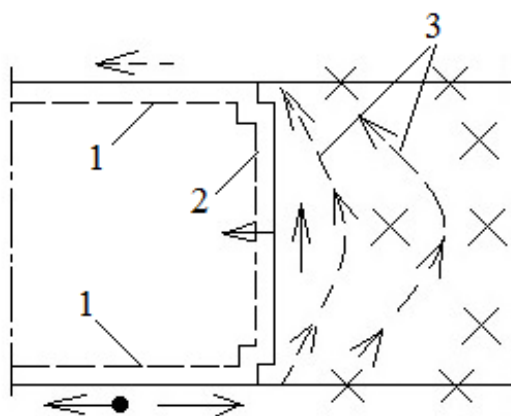


Рис. 2. Столбовая система разработки с восходящим проветриванием выемочного участка и безопасными зонами:

1 – безопасные зоны разгрузки пласта вдоль участковых выработок (вентиляционного и откаточного штреков); 2 – безопасные зоны разгрузки пласта вдоль очистного забоя за счет опережающего горного давления; 3 – зона выноса повышенных концентраций метана из выработанного пространства

Зона разгруженного угля в очистном забое распространяется на 15...30 м от груди забоя до точки угольного пласта, в которой величина опорного давления максимальна, а нагрузка на пласт переходит от одноосного сжатия к его объемному сжатию [9]. Эпюра давления на пласт для условий 1-й северной лавы пласта l_4 шахты «Комсомолец Донбасса» представлена на рис. 3.

Однако у возвратноточной схемы проветривания выемочного участка наблюдается опасный (концентрированный) вынос метана из выработанного пространства на сопряжении лавы с вентиляционным штреком, что требует разработки специальных мер по управлению газовыделением (применение

средств дегазации выработанного пространства, газоотсоса, изолированного отвода метана по необследуемой и неконтролируемой выработке и средств ликвидации местных скоплений, в том числе аэраторов, турбулизаторов, воздушных эжекторов, продольных перегородок в вентиляционных выработках, а также других способов и средств).

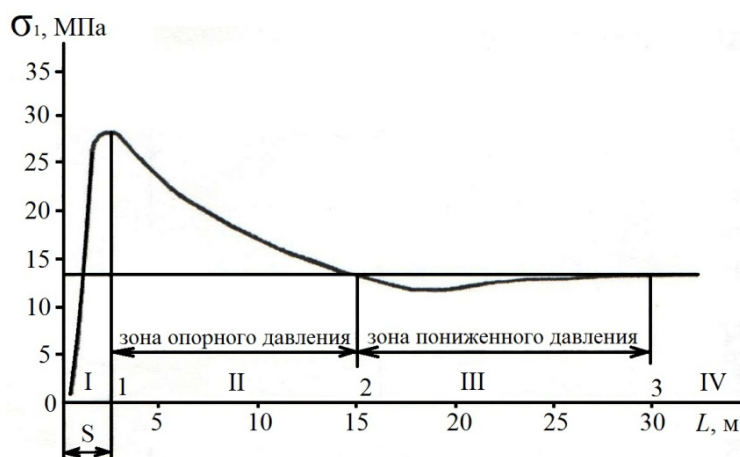


Рис. 3. Эпюра давления на пласт для условий 1-й северной лавы пласта l_4 шахты «Комсомолец Донбасса»:

I – зона разрушенного угля (S) (точки 0-1); II – зона опорного давления (точки 1-2);
III – зона пониженного давления (точки 2-3); IV – зона геостатического давления (точка 3 и далее в глубь массива угля)

Анализ схем проветривания выемочных участков при отработке выбросоопасных пластов по столбовой системе показал, что наиболее безопасны и эффективны прямоточные схемы проветривания с подачей к очистному забою свежего воздуха по штрекам, обеспечивающие два запасных выхода людей в выработки со свежей струей воздуха из зоны выброса и полное обособленное разбавление вредностей (газ, пыль, тепло).

Дополняя вышеизложенное, следует отметить, что газ, выделяющийся из выработанного пространства, рассредоточенно выносится в вентиляционную выработку утечками воздуха, минуя призабойное пространство на протяжении вентиляционного штрека до 50 м усиленной струей воздуха за счет дополнительного подсвеживания исходящей струи воздуха, что снижает удельный вынос и способствует более эффективному его разбавлению.

Кроме того, схемы с полным обособленным разбавлением вредностей обеспечивают максимальную нагрузку на очистной забой по газовому фактору, позволяют исключить образование местных и слоевых скоплений метана на сопряжении очистного забоя с вентиляционным штреком и в нем, а также снизить газообильность и температуру воздуха непосредственно в лаве.

Максимально допустимая нагрузка на очистной забой (по газовому фактору) $A_{\max}$, т/сут, рассчитывается по формуле [10]

$$A_{\max} = A \bar{I}_p^{-1,67} \left[\frac{Q_p (C - C_0)}{194} \right]^{1,93} \left(\frac{l_{\text{оч.п}}}{l_{\text{оч}}} \right)^{-0,67},$$

- где A – добыча угля (фактическая в сутки), при которой определены $\bar{I}_p$ метанообильности лавы и участка в целом, т/сут;
 $\bar{I}_p$ – среднее (абсолютное) метановыделение на выемочном участке ($\bar{I}_{\text{уч}}$) или в очистном забое ($\bar{I}_{\text{оч}}$), м³/мин, принимается по таблице в зависимости от схемы проветривания участка;
 Q_p – расход воздуха (расчетная величина) на выемочном участке ($Q_{\text{уч}}$) или в очистном забое ($Q_{\text{оч}}$), который требуется для снижения концентрации метана до допустимой по Правилам [11] нормы, м³/мин, принимается по таблице в зависимости от схемы проветривания участка;
 C – допустимая концентрация метана в исходящей вентиляционной струе (по объему) согласно Правилам [11], %;
 C_0 – концентрация метана в поступающей к очистному забою струе воздуха, %;
 $l_{\text{оч.п}}$ – длина очистного забоя, для которого определена максимально допустимая нагрузка (по газовому фактору), м;
 $l_{\text{оч}}$ – длина очистного забоя, для которого известны средняя (ожидаемая) метанообильность, среднее метановыделение на выемочном участке и добыча угля (фактическая в сутки), м.

Таблица

Среднее абсолютное метановыделение ($\bar{I}_p$) и расчетный расход воздуха (Q_p) в очистном забое или на участке в зависимости от схемы проветривания

Схема проветривания участка	Направление движения исходящей струи из лавы	Значения	
		расчетного расхода воздуха (Q_p)	среднего абсолютного метановыделения ($\bar{I}_p$)
С последовательным разбавлением метана по источникам выделения (схемы проветривания типа 1В, 1М и 1К)	На массив	$Q_{\text{оч}} \max k_{\text{ут.в}}$	$\bar{I}_{\text{уч}}$
	На выработанное пространство: при $\frac{\bar{I}_{\text{уч}}}{\bar{I}_{\text{оч}}} \leq \frac{k_{\text{ут.в}}}{k_{0,3}}$	$Q_{\text{оч}} \max k_{0,3}$	$\bar{I}_{\text{оч}}$
	при $\frac{\bar{I}_{\text{уч}}}{\bar{I}_{\text{оч}}} > \frac{k_{\text{ут.в}}}{k_{0,3}}$	$Q_{\text{оч}} \max k_{\text{ут.в}}$	$\bar{I}_{\text{уч}}$
С обособленным разбавлением метана по источникам выделения (схемы проветривания типа 2В и 3В)	На выработанное пространство	$Q_{\text{оч}} \max k_{0,3}$	$\bar{I}_{\text{оч}}$

Условные обозначения:

$k_{\text{ут.в}}$ – коэффициент, учитывающий движение воздуха через выработанное пространство, определяемый в зависимости от вмещающих пород и схемы проветривания участка;

$k_{0,3}$ – коэффициент, учитывающий движение воздуха в призабойном пространстве, определяемый в зависимости от вмещающих пород и схемы проветривания участка.

Поэтому при отработке выбросоопасных пластов рекомендуется в первую очередь применять наиболее эффективные и безопасные прямоточные схемы проветривания с полным обособленным разбавлением вредностей и выдачей из лавы исходящей струи воздуха на выработанное пространство, подачей к забою свежего воздуха по двум участковым выработкам (рис. 4). Пунктиром показаны безопасные зоны разгрузки пласта вдоль участковых выработок (вентиляционного и откаточного штреков) и вдоль очистного забоя.

Применение данных схем рекомендуется учитывать в процессе проектирования новых полей, блоков и выемочных участков. Достоинства таких схем проветривания выемочных участков (с полным обособленным разбавлением вредностей):

- практически полное отсутствие потенциально опасных зон;
- расположение ниш в неопасной (дегазированной во время проведения участковых выработок) зоне;
- обособленное разбавление метана, выделяющегося из выработанного пространства, сближенных пластов и вмещающих массив пород, а также из угля, который транспортируют;
- снижение опасности образования метановых скоплений на сопряжении выработанного пространства с действующими выработками участка;
- снижение температуры и запыленности среды в лаве;
- улучшение условий труда работников;
- сокращение путей выхода шахтеров в выработки со свежей струей воздуха при авариях и, соответственно, облегчение доступа горноспасателей к местам расположения людей, застигнутых аварией.

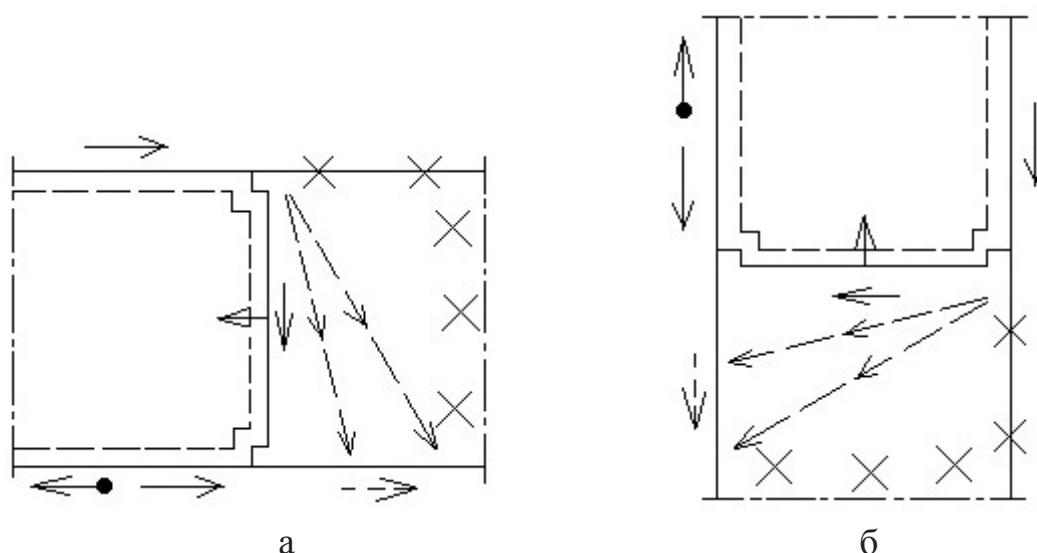


Рис. 4. Рекомендуемые наиболее безопасные схемы проветривания выемочных участков с полным обособленным разбавлением вредностей (типа 3В–Н–н(г)–пт) при отработке выбросоопасных пластов:

- а – отработка выемочного столба осуществляется по простиранию;
б – отработка выемочного столба осуществляется по восстанию

В качестве ремарки следует отметить, что прямоточные схемы с частично обособленным разбавлением вредностей и выдачей исходящей струи на выработанное пространство (типа 2В–Н–в(г)–пт), представленные на рис. 5, следует применять в тех случаях, когда по каким-либо причинам невозможно или затруднительно использовать схемы с полным обособленным разбавлением вредностей (пунктиром показаны безопасные зоны разгрузки пласта вдоль участковых выработок (вентиляционного и откаточного штреков) и вдоль очистного забоя). Однако отрицательный фактор заключается в поступлении в лаву метана, пыли и тепла из конвейерного штрека, что снижает возможную по газовому фактору нагрузку на забой и повышает температуру среды, запыленность воздуха и концентрацию метана в лаве, а также усложняет поддержание вентиляционного штрека в выработанном пространстве.

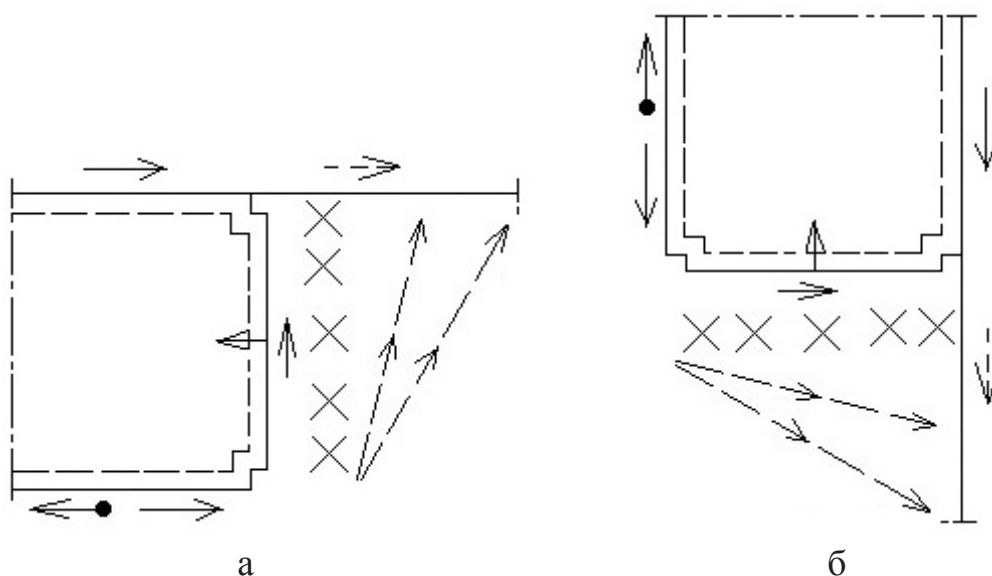


Рис. 5. Прямоточные схемы проветривания с частично обособленным разбавлением вредностей типа 2В–Н–в(г)–пт:

- а – отработка выемочного столба осуществляется по простиранию;
- б – отработка выемочного столба осуществляется по восстанию

Анализ практического применения предложенных схем проветривания на шахтах Донбасса («Комсомолец Донбасса», ш/у «Покровское») помимо обеспечения безопасности шахтеров также показал их высокую эффективность путем увеличения подачи воздуха на участки и нагрузок на очистные забои в 1,5...2 раза, а также снижения температуры и запыленности воздуха в лавах.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Дальнейший прогресс в работе угольной промышленности невозможен без роста нагрузок на очистные забои, снижения травматизма людей и применения прямоточных схем проветривания выемочных участков с полным обособленным разбавлением вредностей при отработке выбросоопасных пластов.

Научно обосновано применение прогрессивных систем разработки и схем проветривания выемочных участков шахт при отработке выбросоопасных угольных пластов с обособленным разбавлением вредностей и наличием двух выработок со свежей струей воздуха, примыкающих к очистному забою, для обеспечения безопасности шахтеров, максимальной нагрузки на очистной забой по газовому фактору, исключения образования местных и слоевых скоплений метана на сопряжении очистного забоя с вентиляционным штреком и в нем, снижения газообильности и температуры шахтной среды непосредственно в очистном забое.

Перспективное направление дальнейших исследований – разработка рекомендаций по снижению газовыделения на выемочных участках при различных схемах проветривания.

Список литературы / References

1. Большинский, М. И. Газодинамические явления в шахтах / М. И. Большинский, Б. А. Лысиков, А. А. Каплюхин. – Севастополь : Вебер, 2003. – 284 с.

Bolshinskiy M. I., Lysikov B. A., Kaplyukhin A. A. *Gazodinamicheskiye yavleniya v shakhtakh* [Gas-dynamic events in mines]. Sevastopol, Veber Publ., 2003, 284 p. (In Russian)

2. Волошин, Н.Е. Выбросы угля, породы в шахтах Донбасса в 1906–2007 гг. / Н. Е. Волошин, Л. А. Вайнштейн, А. М. Брюханов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Донецк : СПД Дмитренко, 2008. – 920 с.

Voloshin N. Ye., Vaynshteyn L. A., Bryukhanov A. M. [et al.]. *Vybrosty uglya, porody v shakhtakh Donbassa v 1906-2007 gg. 2-e izd. pererab. i dop.* [Outbursts of coal, rocks in Donets basin mines in 1906-2007. The 2nd edition, revised and supplemented]. Donetsk, SPD Dmitrenko Publ., 2008, 920 p. (In Russian)

3. Агарков, А. В. Об аварийности в угольных шахтах и применении системы дистанционного контроля состава шахтной среды при проведении горноспасательных работ. – Текст: электронный / А. В. Агарков // Инновационные технологии разработки месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр. – Донецк : ГОУВПО «ДонНТУ», 2019. – № 5. – С. 294 – 313. URL: <http://ed.donntu.org/books/19/cd8966.pdf> (дата обращения: 22.01.2023).

Agarkov A. V. *Ob avariynosti v ugolnykh shakhtakh i primenenii sistemy distantsionnogo kontrolya sostava shakhtnoy sredy pri provedenii gornospasatelnykh rabot* [On accidents in coal mines and application of the mine air content remote monitoring system during conduction of mine-rescue operations]. *Innovatsionnyye tekhnologii razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh* : collection of scientific papers. Donetsk, GOUVPO “DonNTU” Press, 2019, no. 5, pp. 294-313. Available at: <http://ed.donntu.org/books/19/cd8966.pdf> (accessed 22.01.2023). (In Russian)

4. Агеев, В.Г. Закономерности формирования взрывоопасной среды в горных выработках при газодинамических явлениях / В. Г. Агеев, И. Н. Зинченко // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности : научно-технический журнал. – Кемерово, 2013. – № 1–2. – С. 30 – 37.

Ageyev V. G., Zinchenko I. N. *Zakonomernosti formirovaniya vzryvoopasnoy sredy v gornyykh vyrabotkakh pri gazodinamicheskikh yavleniyakh* [Regularities of explosive atmosphere formation in working areas during gas-dynamic events]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti* : scientific-technical journal. Kemerovo, 2013, no. 1-2, pp. 30-37. (In Russian)

5. Левкин, Н. Б. Предотвращение аварий и травматизма в угольных шахтах Украины / Н. Б. Левкин. – Донецк : Донбасс, 2002. – 393 с.

Levkin N. B. *Predotvrashcheniye avariyy i travmatizma v ugolnykh shakhtakh Ukrainy* [Prevention of accidents and injuries in coal mines of Ukraine]. Donetsk, Donbass Publ., 2002, 393 p. (In Russian)

6. Голинько, В. И. Аварийно-спасательные работы в шахтах / В. И. Голинько, С. А. Алексеенко, И. Н. Смоланов. – Днепропетровск : Лира ЛТД, 2011. – 450 с.

Golinko V. I., Alekseyenko S. A., Smolanov I. N. *Avariyno-spasatelnyye raboty v shakhtakh* [Mine-rescue operations in mines]. Dnepropetrovsk, Lira LTD Publ., 2011, 450 p. (In Russian)

7. Симонов, А. М. Проветривание аварийных участков шахт после внезапных выбросов угля, породы и газа / А. М. Симонов, Н. В. Карнаух, А. В. Агарков // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2021. – № 3(58). – С. 68 – 79.

Simonov A. M., Karnaukh N. V., Agarkov Al. V. *Provetrivaniye avariynykh uchastkov shakht posle vnezapnykh vybrosov uglya, porody i gaza* [Ventilation of accident areas of mines after sudden coal, rock and gas outbursts]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*. Donetsk, 2021, no. 3(58), pp. 68-79. (In Russian)

8. Обеспечение безопасности ведения аварийно-спасательных работ в шахтах после внезапных выбросов / А. М. Симонов, Н. В. Карнаух, А. В. Агарков, В. В. Захлебін // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2022. – № 2(59). – С. 82 – 93.

Simonov A. M., Karnaukh N. V., Agarkov Al. V., Zakhlebin V. V. *Obespecheniye bezopasnosti vedeniya avariyno-spasatelnykh rabot v shakhtakh posle vnezapnykh vybrosov* [Provision of safety of emergency operations carrying-out in mines after sudden outbursts]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*. Donetsk, 2022, no. 2(59), pp. 68-79. (In Russian)

9. Антипов, И. В. Способы региональной защиты отрабатываемых выбросоопасных пластов / И. В. Антипов, С. В. Балов, И. Е. Золотухин // Работы ДонУГИ : сборник научных трудов. – Донецк : ДонУГИ, 2018. – № 109. – С. 69 – 84.

Antipov I. V., Balov S. V., Zolotukhin I. Ye. *Sposoby regionalnoy zashchity otrabatyvayemykh vybrosoopasnykh plastov* [Methods of regional protection of the mined outburst-prone seams]. *Raboty DonUGI* : collection of scientific papers. Donetsk, DonUGI Publ., 2018, no. 109, pp. 69-84. (In Russian)

10. Руководство по проектированию вентиляции угольных шахт : утв. приказом Государственного Комитета по надзору за охраной труда от 20.12.1993 № 131. – Киев, 1994. – 311 с.

Rukovodstvo po proyektirovaniyu ventilyatsii ugolnykh shakht : utv. prikazom Gosudarstvennogo Komiteta po nadzoru za okhranoy truda ot 20.12.1993 № 131 [Ventilation of coal mines design guidelines : as amended by the decree of the State Committee on labour safety control of December 20, 1993 № 131]. Kiev, 1994, 311 p. (In Russian)

11. Правила безопасности в угольных шахтах : утв. совмест. приказ. МУЭ ДНР и Гортехнадзора ДНР 18.04.2016 № 36/208 (с внесенными изменениями). – Макеевка : Полипресс, 2016. – 219 с.

Pravila bezopasnosti v ugolnykh shakhtakh : utv. sovместnym prikazom MUE DNR i Gortekhnadzora DNR ot 18.04.2016 № 36/208 (s vnesennymi izmeneniyami) [Safety rules in coal mines : as amended by the joint decree of Ministry of Coal and Energetics of the DPR and the Municipal Committee on technical supervision of the DPR of April 18, 2016 № 36/208 (with amendments)]. Makeyevka, Polipress Publ., 2016, 219 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 10.02.2023
Дата опубликования 17.03.2023

Aleksandr Mikhaylovich Simonov, head of department; e-mail: simonov54_54@mail.ru;
Nikolay Viktorovich Karnaukh, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: avrstla@mail.ru;
Aleksandr Vladislavovich Agarkov, principal engineer; e-mail: aleksander_agarkov@mail.ru
State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”
of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”
238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-34

MINING SYSTEMS AND VENTILATION SCHEMES OF WORKING AREAS DURING EXTRACTION OF OUTBURST-PRONE SEAMS

Purpose. Selection of mining systems and ventilation schemes during extraction of the outburst-prone seams for reducing the gas emission at the working areas of mines.

Methods. The analytical method of investigation has been applied.

Results. It has been determined that during the extraction of the outburst-prone seams the safety of mining operations, the rate and intensity of sudden outbursts are affected by the mining engineering factors, the complex mining and geological conditions and mining systems of the working areas. The basic requirements to the ventilation schemes of the areas during extraction of the gas-saturated outburst-prone seams have been characterized.

Scientific novelty. The application of progressive mining systems and ventilation schemes of the mining areas during the extraction of outburst-prone coal seams with separated dilution of contaminants according to the sources of their emission and the presence of two working areas adjacent to the breakage face containing the fresh air stream has been scientifically grounded in order to provide the safety and to create the comfortable work conditions for miners, to elevate the maximum load of the breakage face by the gas factor, to exclude the formation of local and layer methane accumulations at the roadheads of face and airway and inside of it, to reduce the gas content and air temperature in the face.

Practical value. The schematic diagrams of working areas with various mining systems, ventilation schemes, outburst areas and safe zones have been developed. It has been substantiated that the draw-through ventilation schemes with fresh air feeding to the face through the mining areas providing two means of egress for people out of the outburst zone to the working areas with fresh air stream as well as fully separated dilution of contaminants (gas, dust, heat) are the most safe and effective ones which is recommended to take into account in designing the new fields, blocks and working areas.

Keywords: *coal mine; working area; extraction systems; ventilation schemes; outburst-prone coal seams; safety of miners.*

УДК 622.822.225

*Ирина Геннадьевна Старикова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: ir-starik@yandex.ru**Государственное бюджетное учреждение**«Институт физики горных процессов»**283114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72. Тел.: +7(949) 332-12-36*

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ САМОНАГРЕВАНИЯ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

Цель. Установление количественных закономерностей влияния массопереноса кислорода и теплопередачи во вмещающие породы на кинетику температурного режима угольного пласта и способность его к самовозгоранию для повышения достоверности оценки пожароопасности угольного пласта.

Методы. Используются методы физического и математического моделирования, современные методы асимптотического и численного анализа уравнений в частных производных, описывающие тепло- и массоперенос в горных выработках, проводились адекватные физические эксперименты на стандартном теплофизическом оборудовании для установления условий зарождения и развития очагов самовозгорания.

Результаты. Получен критерий самовозгорания угольного пласта, установлен его инкубационный период.

Научная новизна. Обоснован новый критерий самовозгорания, учитывающий в количественном виде теплоотдачу из угля во вмещающие породы, скорость сорбции кислорода углем, толщину угольных слоев в пласте, пустотность угля и локальную концентрацию кислорода на его поверхности.

Практическая значимость. Разработана методика прогноза времени самонагрева и самовозгорания угольных массивов разной степени нарушенности для повышения достоверности оценки склонности к самовозгоранию угля.

Ключевые слова: уголь; коэффициент теплоотдачи; тепловой поток; температура; теплоемкость; самовозгорание.

Постановка проблемы. Самонагревание, самовозгорание и пожароопасность угольных пластов до настоящего времени остается нерешенной проблемой в плане пожарной безопасности. Это явление наблюдается в скоплениях отбитого угля, в отрабатываемых угольных пластах и целиках.

Анализ последних публикаций. Начиная с первой половины XX века было выдвинуто несколько теорий самовозгорания [1, 2]. Эти теории оперируют следующими понятиями: «теплопроводность», «теплоемкость», «тепловой эффект реакции кислород – уголь», «константа скорости сорбции кислорода углем» и «коэффициент теплоотдачи из угля в окружающую среду» [3, 4].

При решении задачи о тепловом режиме отрабатываемых пластов и целиков необходимо учитывать теплоотдачу от угля во вмещающие породы и в выработанное пространство. До настоящего времени эти факторы учитывали отдельно.

Изложение основного материала. Предлагается следующая физическая модель пространственно-временного распределения температуры в угольном пласте (рис. 1).



Рис. 1. Пространственно-временное распределение температуры в краевой части угольного пласта

1. Пласт угля представляет собой однородную среду с эффективной теплопроводностью λ , плотностью ρ и удельной теплоемкостью C .

2. Пласт полуограничен по простиранию: сверху и снизу он ограничен породой, а с торца ($x=0$) граничит с выработанным пространством. Температура породы, как и температура рудничной атмосферы, предполагается неизменной и равной начальной температуре пласта T_0 .

3. Для пластов малой мощности (по сравнению с «длиной остывания», см. далее) неоднородностью температуры по поперечному сечению пласта можно пренебречь и свести задачу к одномерной, когда температура меняется лишь по простиранию.

4. Концентрация c кислорода, находящегося в фильтрационном объеме угля (системе каналов, трещин, пор), остается постоянной. Дело в том, что при низкотемпературном окислении, вследствие медленности этой реакции, даже небольшого притока кислорода и обычной фильтрации достаточно, чтобы его объемная доля в течение всего периода низкотемпературного окисления мало отличалась от ее среднего эффективного значения.

Для решения задачи о зависимости температуры угля от координаты и времени $T(x, \tau)$ следует записать уравнение теплопроводности с определенными начальными и граничными условиями. Необходимо выделить отдельные составляющие скорости изменения температуры угля.

Во-первых, температура $T^{(1)}$ изменяется за счет теплопроводности вдоль оси x . Эта составляющая имеет стандартный вид

$$\frac{\partial T^{(1)}}{\partial \tau} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ при } (0 \leq x < \infty), \quad (1)$$

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

Во-вторых, имеется теплоотвод от угля в окружающие породы. Согласно гипотезе Ньютона, плотность теплового потока q через границу пропорциональна разности температур приграничных слоев контактирующих сред. Используя предположения 2 и 3 физической модели, получим

$$q = \alpha_2(T(x, \tau) - T_0), \quad (2)$$

где α_2 – коэффициент теплопередачи от угля в породе, Вт/(м²·К).

Выделим внутри пласта объем

$$V = Sdx,$$

где S – площадь поперечного сечения пласта м²,

dx – элемент длины по его простиранию, м.

Тепловой поток из выделенного объема определяется периметром L поперечного сечения пласта и равен

$$dQ = qLdx = \alpha_2(T - T_0)Ldx.$$

Вынос теплоты сопровождается уменьшением температуры пласта $T^{(2)}$ со скоростью

$$\frac{\partial T^{(2)}}{\partial \tau} = -\frac{dQ}{C_p dV} = -\frac{\alpha_2(T - T_0)Ldx}{C_p Sdx}.$$

Учтем теперь, что геометрия пласта обычно приводит к соотношению

$$\frac{L}{S} \approx \frac{2}{h}, \quad (3)$$

где h – мощность угольного пласта, м.

Следовательно,

$$\frac{\partial T^{(1)}}{\partial \tau} = -\frac{2\alpha_2(T - T_0)}{C_p h},$$

или, в иной форме, используя связь $a = \frac{\lambda}{C_p}$ между температуропроводностью и теплопроводностью, получим

$$\frac{\partial T^{(2)}}{\partial \tau} = -\frac{2a\alpha_2(T - T_0)}{\lambda h}. \quad (4)$$

В-третьих, реакция окисления угля происходит с выделением теплоты, благодаря чему пласт разогревается. Скорость тепловыделения в единице объема пласта пропорциональна тепловому эффекту окисления q и количеству кислорода, вступающего в реакцию в единицу времени в единице объема пласта. Очевидно, что указанное количество кислорода пропорционально доле объема пласта, в которой может находиться газ, то есть пустотности Π . Мы приходим к заключению, что скорость генерации теплоты равна

$$\frac{dQ}{d\tau} = q\Pi \frac{dc}{d\tau}, \quad (5)$$

где c – концентрация кислорода в газе, заполняющем фильтрационный объем угля, %.

В настоящее время принято считать [5], что на представляющем практический интерес температурном интервале (270...300 К) окисление угля является реакцией первого порядка

$$\frac{\Delta c}{\Delta \tau} = c\varphi(T), \quad (6)$$

где $\varphi(T)$ – коэффициент пропорциональности (константа скорости сорбции) – это вероятность вступления молекулы кислорода в реакцию с углем за единицу времени, с^{-1} .

В теории самовозгорания промышленных материалов принято использовать константу скорости сорбции, отнесенную к единице массы окисляющегося материала (в нашем случае угля). Из выражений (5) и (6) следует, что

$$\frac{dQ}{d\tau} = q\Pi\varphi(T). \quad (7)$$

Если разделить эту величину на C_p , получим скорость изменения температуры $T^{(3)}$

$$\frac{\partial T^{(3)}}{\partial \tau} = \frac{q c \varphi(T) \Pi}{C_p} = \frac{q c \varphi(T) \Pi a}{\lambda}. \quad (8)$$

Общее уравнение теплопроводности имеет вид

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial T^{(1)}}{\partial \tau} + \frac{\partial T^{(2)}}{\partial \tau} + \frac{\partial T^{(3)}}{\partial \tau}, \quad (9)$$

где стоящие в правой части производные определяются формулами (1), (4) и (8) соответственно.

Начальное условие уравнения (9) следующее

$$T(x, 0) = T_0. \quad (10)$$

Граничное условие (при $x = 0$) принимается по гипотезе Ньютона

$$\lambda \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = \alpha_1 (T(0, \tau) - T_0), \quad (11)$$

где α_1 – коэффициент теплопередачи от угля в рудничную атмосферу, Вт/(м²·К).

Перейдем теперь к безразмерной форме записи уравнения теплопроводности и граничного условия (1). С этой целью введем первую и вторую «длину остывания»

$$l_1 \equiv \frac{\lambda}{\alpha_1}; \quad l_2 \equiv \frac{\lambda}{\alpha_2} \quad (12)$$

и измеряем «длину остывания» l_1 , а время – по формуле $\tau = (l_1^2) / a$. Сохраняя для безразмерных времени и координаты те же обозначения, что и для размерных, получим

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{qc\varphi(T)\Pi l_1^2}{\lambda} - \frac{2l_1^2}{l_2 h} (T - T_0). \quad (13)$$

Граничное условие (11) запишем в виде, не содержащем параметров:

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = T(0, \tau) - T_0. \quad (14)$$

Из работы [5] известно, что по закону Аррениуса константа скорости сорбции φ зависит от температуры

$$\varphi(T) = \varphi_{\max} e^{-E/T}, \quad (15)$$

где E – энергия активации для реакции кислород – уголь (температуру измеряем в энергетических единицах).

Если E достаточно велика, более 0,1 эВ (то есть более 1000 К), то температурная зависимость $\varphi(T)$ чрезвычайно резкая. Однако на небольшом, порядка 100 К, температурном интервале вполне допустима [6] линейная аппроксимация этой зависимости

$$\varphi(T) = \varphi(T_0) + \left. \frac{d\varphi}{dT} \right|_{T=T_0} (T - T_0) = U_0 + E(T - T_0). \quad (16)$$

Эта формула дает возможность представить внутренние источники теплоты в виде линейной функции. Обозначения и комментарии к формуле (16) взяты из работы [5].

Подставляя выражение (16) в выражение (13) и вводя обозначения

$$\eta = \frac{qcEl_1^2\Pi}{\lambda}; \quad b = \frac{2l_1^2}{l_2 h}; \quad \beta = \frac{qcU_0 l_1^2\Pi}{\lambda}; \quad \kappa = b - \eta, \quad (17)$$

получаем уравнение теплопроводности в линейном виде

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} - \kappa(T(x, \tau) - T_0) + \beta. \quad (18)$$

Пласт считается столь тонким, что можно пренебречь изменением температуры по толщине пласта. Тогда $T(x, \tau)$ означает среднюю по сечению температуру в данном месте, где x – координата по простиранию пласта.

В начале процесса самонагрева уравнение (18) принимает вид

$$\frac{\partial(T - T_0)}{\partial \tau} = -(b - \eta)(T - T_0) + \beta.$$

На начальном этапе процесса

$$(T - T_0) = \beta\tau. \quad (19)$$

На рис. 2 приведена зависимость нагревания угольного образца от времени.

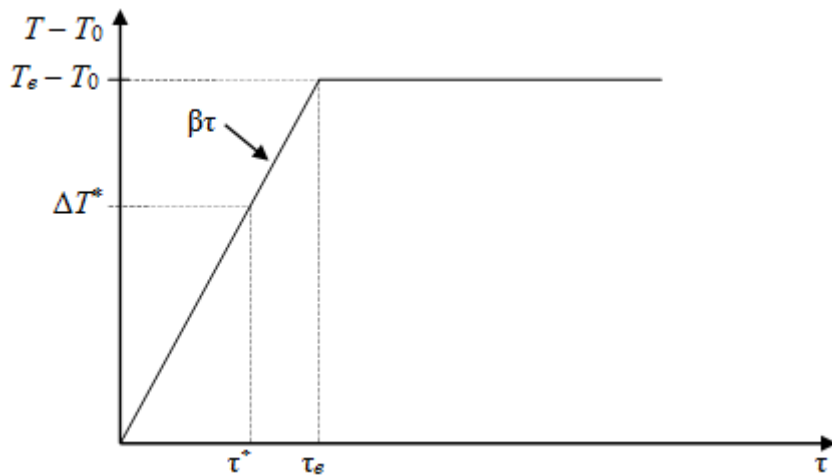


Рис. 2. Динамика нагревания угольного образца

На отрезке времени τ_e наступает стабилизация температуры. Стабилизируем температуру на уровне $T_e - T_0 \approx \frac{\beta}{b - \eta}$. Для этого приравниваем к нулю правую часть уравнения (18) и находим соответствующее время стабилизации температуры

$$\tau_e = \frac{1}{b - \eta} = \frac{hC_V}{2\alpha_2 - q\Pi c E h}.$$

Из рис. 2 видно, что время самовозгорания

$$\tau^* = \frac{\Delta T^*}{\beta} = \frac{\Delta T^* C_V}{q\Pi c U_0}.$$

Критерий самовозгорания принимает вид [7, 8]

$$\frac{\beta}{(b - \eta)\Delta T^*} > 1 \quad \text{или} \quad \frac{U_0}{\Delta T^* E \left(\frac{2\alpha_2}{hq\Pi c E} - 1 \right)} > 1.$$

Алгоритм определения инкубационного периода самовозгорания угольного пласта следующий.

1. Проверяем критерий самовозгорания

$$\frac{U_0}{\Delta T^* E \left(\frac{2\alpha_2}{hq\Pi c E} - 1 \right)} > 1.$$

2. Если он выполняется, находим инкубационный период

$$\tau_i = \frac{\Delta T^* C_V}{q\Pi c U_0}.$$

3. Иначе находим время самонагревания углей

$$\tau_e = \frac{hC_V}{2\alpha_2 - q\Pi c E h}.$$

В табл. 1 приведены исходные данные по произошедшим авариям, а в табл. 2 – расчетные.

Таблица 1

Исходные данные

Шахта, пласт, марка угля	Дата аварии	Мощность пласта h , м	Удельная теплоемкость C , Дж/(кг·К)	Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·К)	Теплота реакции q , 10⁶ Дж/м³	Пустотность пласта Π	Концентрация кислорода c , %	Температурный коэффициент скорости сорбции E , 10⁻⁶ 1/(с·К)	Константа скорости сорбции U_0 , 10⁻⁵ с⁻¹	Температура ΔT , К
«Самсоновская-Западная», k_2^H , Ж	11.05.2003	1,2	1820000	0,11	12,57	0,12	20	0,6	2,5	82
«Северная», l_8^1 , К	21.06.2009	1,4	1820000	0,12	12,57	0,12	20	0,56	2,5	90
«Пионер», m_4^2 , К	23.09.2010	1,02	1820000	0,1	12,57	0,12	20	0,6	2,5	93

Таблица 2

Расчетные параметры пожароопасности

Шахта, пласт, марка угля	Дата аварии	Критерий пожароопасности	Время самовозгорания, мес.	Фактическое время самовозгорания, мес.
«Самсоновская-Западная», k_2^H , Ж	11.05.2003	39	8,3	9
«Северная», l_8^1 , марка К	21.06.2009	34	8,4	8
«Пионер», m_4^2 , марка К	23.09.2010	5,4	8,6	10

Выводы.

1. Получены зависимости для определения динамики температуры в любой точке угольного пласта.
2. Теплопередача в выработанное пространство влияет не на критерий самонагревания, а только на пространственное перераспределение температуры вблизи концевой участка пласта.
3. Разработаны методики расчета критерия пожароопасности угольных пластов, времени их самонагревания и самовозгорания для повышения достоверности оценки пожароопасности пласта.

Список литературы / References

1. Подкопаев, С. В. О склонности углей к самовозгоранию на современных глубинах разработки / С. В. Подкопаев, С. А. Крутенко // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2008. – № 1(17). – С. 135 – 137.

Podkopaev S. V., Krutenko S. A. *O sklonnosti ugley k samovozgoraniyu na sovremennykh glubinakh razrabotki* [On coal liability to spontaneous combustion on current depths of mining]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB*, 2008, no. 1(17), pp. 135-137. (In Russian)

2. Young, D. Annual Environmental Management Report for the Narrabri Coal Mine (ML 1609), 2010-2011. Sydney, Narrabri Coal Operations Pty Ltd. URL: <https://whitehavencoal.com.au/Documentations/Narrabri%20Mine/Environmental%20Management,%20Monitoring%20&%20Compliance/Annual%20Reviews/NAR-Annual%20Environmental%20Management%20Review%202010-2011.pdf> (дата обращения: 02.02.2023).

3. Голынская, Ф. А. Концептуальные положения о геологических факторах самовозгорания углей / Ф. А. Голынская // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – Вып. 1. – С. 35 – 39.

Golynskaya F. A. *Kontseptualnyye polozheniya o geologicheskikh faktorakh samovozgoraniya ugley* [Conceptual statements on geological factors of spontaneous

combustion of coal]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, 2009, issue 1, pp. 35-39. (In Russian)

4. Arisoy A., Beamish B., Cetegen E. Modelling spontaneous combustion of coal. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 2006, no. 30, pp. 193-201. URL: https://www.researchgate.net/publication/43456128_Modelling_spontaneous_combustion_of_coal (дата обращения: 02.02.2023).

5. Глузберг, Е. И. Теоретические основы прогноза и профилактики шахтных эндогенных пожаров / Е. И. Глузберг. – М. : Недра, 1986. – 161 с.

Gluzberg Ye. I. *Teoreticheskiye osnovy prognoza i profilaktiki shakhtnykh endogennykh pozharov* [Theoretical background of prediction and prevention of mine spontaneous fires]. Moscow, Nedra Publ., 1986, 161 p. (In Russian)

6. Научные основы метода прогноза очагов самовозгорания угля / Г. П. Стариков, В. В. Завражин, И. Г. Старикова [и др.] // Физико-технические проблемы горного производства. – 2006. – Вып. 9. – С. 102 – 107.

Starikov G. P., Zavrzhin V. V., Starikova I. G. [et al.]. *Nauchnyye osnovy metoda prognoza ochagov samovozgoraniya uglya* [Scientific foundations of method for predicting the points of origin of coal spontaneous combustion]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva*, 2006, issue 9, pp. 102-107. (In Russian)

7. Фельдман, Э. П. Самонагревание угольного пласта в условиях затрудненного доступа кислорода / Э. П. Фельдман, И. Г. Старикова // Химия твердого топлива. – 2013. – № 1. – С. 16 – 23.

Feldman E. P., Starikova I. G. *Samonagrevaniye ugolnogo plasta v usloviyakh zatrudnennogo dostupa kisloroda* [Spontaneous heating of coal seam in conditions of obstructed access of oxygen]. *Khimiya tverdogo topliva*, 2013, no. 1, pp. 16-23. (In Russian)

8. Фельдман, Э. П. Самонагревание и температурный режим маломощных угольных пластов / Э. П. Фельдман, И. Г. Старикова // Горноспасательное дело : сборник научных трудов / НИИГД «Респиратор». – 2011. – Вып. 48. – С. 84 – 94.

Feldman E. P., Starikova I. G. *Samonagrevaniye i temperaturnyy rezhim malomoshchnykh ugolnykh plastov* [Spontaneous heating and temperature regime of thin coal bed seams]. *Gornospasatelnoye delo : collection of scientific papers of the NIIGD "Respirator"*, 2011, issue 48, pp. 84-94. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С. П. Грековым
Дата поступления рукописи 17.02.2022
Дата опубликования 17.03.2022

Irina Gennadiyevna Starikova, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate;

e-mail: ir-starik@yandex.ru

State Budgetary Establishment "Institute of Physics of Mining Processes"

283114, Donetsk, 72, ulitsa Rozy Luxemburg. Phone: (+7 949) 332-12-36

METHOD OF DETERMINATION OF COAL SEAM SPONTANEOUS HEATING PERIOD

Purpose. Determination of quantitative regularities of dependence of the influence of oxygen mass and heat transfer into adjacent rocks on the temperature mode kinetics of a coal seam and its spontaneous combustion ability in order to improve the reliability of coal seam fire hazard assessment.

Methods. The methods of physical and mathematical modeling have been applied as well as the present-day techniques of asymptotic and numerical analysis of equations in partial derivatives describing heat and mass transfer in mine workings; the adequate physical experiments have been conducted on the conventional thermophysical equipment in order to determine the conditions for inception and development of spontaneous combustion points of origin.

Results. The criterion of spontaneous combustion of coal seam has been obtained, its incubation period has been determined.

Scientific novelty. The new criterion of spontaneous combustion has been substantiated taking into account the quantitative heat transfer from coal into adjacent rocks, the rate of oxygen sorption by coal, the width of coal layers in the strata, cavitation of coal and local concentration of oxygen on its surface.

Practical value. The technique for predicting the period of spontaneous heating and combustion of coal massifs with different degree of tectonic decomposition has been developed in order to improve the reliability of assessment of coal propensity to spontaneous combustion.

Keywords: *coal; heat transfer coefficient; heat flow; temperature; heat capacity; spontaneous combustion.*

УДК 614.842.628:622.65.03

Станислав Александрович Калякин, д-р техн. наук, проф.; e-mail: yglenit@gmail.com
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донецкий национальный технический университет»
283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: (+7 949) 399-14-71
Евгений Александрович Головченко, нач. отд.; e-mail: ennio_80@mail.ru;
Михаил Александрович Белокобыльский, инж.; e-mail: obep.niigd@list.ru
Государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 949) 340-97-96

ЗАВИСИМОСТЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ПЫЛИ ОТ ВЫХОДА ЛЕТУЧИХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Установление зависимости температуры воспламенения угольной пыли разной степени метаморфизма от выхода летучих веществ с поверхности частиц угля и газокинетических факторов для повышения пожарной безопасности ведения горных работ.

Методы. Экспериментальные исследования степени воспламенения частиц пыли угля.

Результаты. Проведенные исследования позволили установить зависимость температуры воспламенения угольной пыли различной степени метаморфизма от выхода летучих веществ и от размеров частиц пыли.

Научная новизна. Впервые для различных фракций угольной пыли определены полиномиальные зависимости ее температуры воспламенения от выхода летучих веществ, которые показывают существенное влияние наночастиц угольной пыли на пожаровзрывоопасность.

Практическая значимость. Полученные зависимости позволяют значительно улучшить оценку пожаровзрывоопасных свойств наночастиц угольной пыли различной степени метаморфизма и пожарную безопасность ведения горных работ.

Ключевые слова: наночастица; угольная пыль; пожаровзрывоопасность; температура воспламенения; температура самовоспламенения; выход летучих веществ.

Постановка проблемы. Процесс горения частицы угольной пыли представляет собой окислительную гетерогенную химическую реакцию первого порядка. Реакцией горения частицы угольной пыли является взаимодействие углерода С с кислородом O_2 , поступающим к поверхности частицы за счет диффузии из основного потока с образованием оксида углерода СО и диоксида углерода CO_2 .

При этом используется модель, согласно которой угольные частицы малых размеров приобретают скорость, близкую к скорости движения потока воздуха. При таком условии вынужденный конвективный перенос массы отсутствует, и угольная частица выгорает равномерно.

Образование продуктов сгорания и их участие в процессе горения зависит от температуры процесса: при температурах менее 700 °С образуются СО и CO_2 , при более высоких температурах (790...1190 °С) возможна вторичная реакция догорания образовавшегося СО вблизи поверхности угольной частицы до CO_2 , при этом часть CO_2 за счет эндотермических реакций может

вновь смешиваться с углеродом, образуя СО, который в результате взаимодействия с кислородом в зоне пламени вокруг частицы догорает.

При температурах выше 1190...1290 °С при минимальном участии кислорода процесс горения протекает по гетерогенной реакции $C + CO_2 = 2CO$ с последующим догоранием СО на некотором расстоянии от поверхности частицы в зоне пламени.

Угольная пыль обладает высокой пористостью, что повышает возможность возникновения окислительных химических реакций за счет диффузии.

Важная характеристика пористости угля – удельная внутренняя поверхность, значения которой для частиц угля размером 100 мкм изменяются в пределах 380...4810 м²/кг в зависимости от стадии метаморфизма твердого топлива [1]. В процессе окисления удельная внутренняя поверхность угольной частицы увеличивается за счет испарения влаги, выхода летучих веществ, изменения температуры и других факторов, что способствует более интенсивному проникновению кислорода и других газов внутрь частицы и повышает ее пожароопасные свойства.

Анализ последних исследований и публикаций. При воспламенении частиц угля процесс внутренней диффузии газов можно рассматривать как самостоятельный, не зависящий от характера диффузионных процессов в зоне горения. Скорость диффузионного потока зависит от проницаемости угля, интенсивности реагирования на поверхности его пор и определяется значениями кинетических констант, размером внутренней реакционной поверхности в единице объема частицы. Чем выше активность и воспламеняемость угля и ниже температура его воспламенения, тем в меньшей степени увеличивается внутренняя поверхность частиц во время термической деструкции на начальных стадиях горения и тем меньшее значение имеет внутреннее реагирование компонентов реакции. И наоборот, чем меньше тепловой эффект реакции горения топлива и чем выше температура его воспламенения, тем процессы, приводящие к раскрытию пор угольного вещества, протекают полнее и значение внутреннего реагирования компонентов выше. С повышением температуры горения внутреннее реагирование частиц угля ослабевает [2, 3].

Стадии горения частицы угольной пыли предшествует ряд факторов, существенно влияющих на процесс, а именно: подогрев и подсушка угольной частицы; ее деструкция с выделением летучих веществ; горение летучих веществ и др. Важная особенность горения частиц угольной пыли – четко выраженная стадийность с резким изменением характера закономерностей развития каждой стадии реакции окисления во времени.

Экспериментальные исследования динамики выгорания частицы твердого топлива позволили создать модель горения частицы угля в промежуточном режиме – от кинетического ближе к диффузионному режиму [4, 5]. Горючие летучие вещества, выделяющиеся при термодеструкции из частицы угольной пыли, имеют более низкую температуру воспламенения, чем ее углеродный остаток, поэтому они обеспечивают инициирование данного процесса.

Интенсивность выхода газов свидетельствует о глубине деструкции, прямое следствие которой – активация образующейся новой реакционной поверхности твердого остатка за счет повышения пористости частицы. Образование летучих веществ в частице приводит к повышению ее внутреннего давления и к развитию трещин на поверхности твердого остатка, что способствует существенной интенсификации процесса горения, особенно на заключительной его стадии.

В то же время выделяющиеся летучие вещества обволакивают частицу и при определенных условиях препятствуют диффузии кислорода к ее поверхности, тем самым они немного тормозят основные гетерогенные реакции окисления при горении. Однако, как показали исследования, данный процесс наблюдается только у относительно крупной частицы размером 1000 мкм и более [6].

Чем больше размер частиц, тем относительно меньшая доля летучих веществ выделяется до момента их воспламенения и тем большая их часть выгорает параллельно с гетерогенным реагированием на поверхности частицы.

Цель статьи – установить зависимость температуры воспламенения угольной пыли разной степени метаморфизма от выхода летучих веществ с поверхности частиц угля и газокинетических факторов для повышения пожарной безопасности ведения горных работ.

Результаты исследований. Дисперсный состав пыли, зависящий от ее удельной поверхности, – существенный фактор, определяющий взрывчатость угольной пыли [2, 6]. Увеличение степени ее измельчения не всегда приводит к линейному росту силы взрыва и в отдельных случаях достигает максимума при диаметре частиц примерно 10 мкм.

На угольных шахтах Донбасса были отобраны пробы каменного угля различной стадии метаморфизма (различных марок угля).

Данные о проведенном исследовании отобранных проб представлены в табл. 1.

Таблица 1

Технический и элементный состав отобранных проб каменного угля

Предприятие, пласт, марка угля	Технический состав, %			Элементный состав, %			
	Выход летучих веществ I_{daf}^1	Золь- ность A^d	Содер- жание серы S	Угле- род C	Водо- род H	Кисло- род O	Азот N
ЧПП «Горняк-95», k_4^1 , ОС	20,5	28,0	1,0	89,44	4,52	3,43	1,59
ГУП ЛНР «РТК «Востокуголь» ПП «Ш/у «Краснодонское» Шахта «Самсоновская- Западная», k_2^H , Жк	34,2	26,2	2,8	84,42	5,25	6,40	2,60
ГУП ЛНР «Центруголь» «Шахта XIX съезда КПСС», l_1 , Г	39,9	13,9	3,9	76,47	4,62	13,09	3,02

Для проведения экспериментальных исследований были подготовлены фракции угля со средним диаметром частиц от 0,05 (50 мкм) до 0,75 мм (750 мкм), что соответствует размеру наиболее пожаровзрывоопасных фракций угольной пыли.

Одни из основных показателей, характеризующих пожаровзрывоопасность угольной пыли, – температура воспламенения t_b , °С, и температура самовоспламенения t_{cb} , °С. Они установлены в диапазоне от 25...600 °С [7]. Результаты экспериментального определения температуры воспламенения и самовоспламенения различных фракций угольной пыли представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментального определения температуры воспламенения и самовоспламенения различных фракций угольной пыли

Средний размер фракции d , мкм	Температура воспламенения t_b , °С, при различном V^{daf} , %			Температура самовоспламенения t_{cb} , °С, при различном V^{daf} , %		
	20,5	34,2	39,9	20,5	34,2	39,9
50	551	371,0	320,0	> 600,0	> 600,0	562,0
150	–	368,0	290,0	–	> 600,0	558,0
175	542,5	–	–	> 600,0	–	–
275	–	371,5	325,5	–	> 600,0	560,5
375	542,5	–	–	> 600,0	–	–
425	–	378	340,0	–	> 600,0	530,5
750	545,0	373	350,0	> 600,0	546,0	536,5

Особенности используемых методов [6, 7] не позволили установить точные значения температуры самовоспламенения всех исследуемых стадий метаморфизма, поэтому в дальнейшем определены значения только температуры воспламенения различных фракций угольной пыли (рис. 1).

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением выхода летучих веществ (понижением стадии метаморфизма) уменьшаются значения температуры воспламенения t_b , °С. Для каждого исследуемого угля установлены полиномиальные зависимости температуры воспламенения фракции от ее размера. Однако для наименьшей фракции угольных частиц 50 мкм из всех стадий метаморфизма отмечены повышенные значения t_b , °С, которые не соответствуют общему характеру зависимостей и могут свидетельствовать об изменении механизма исследуемого процесса воспламенения угольной пыли.

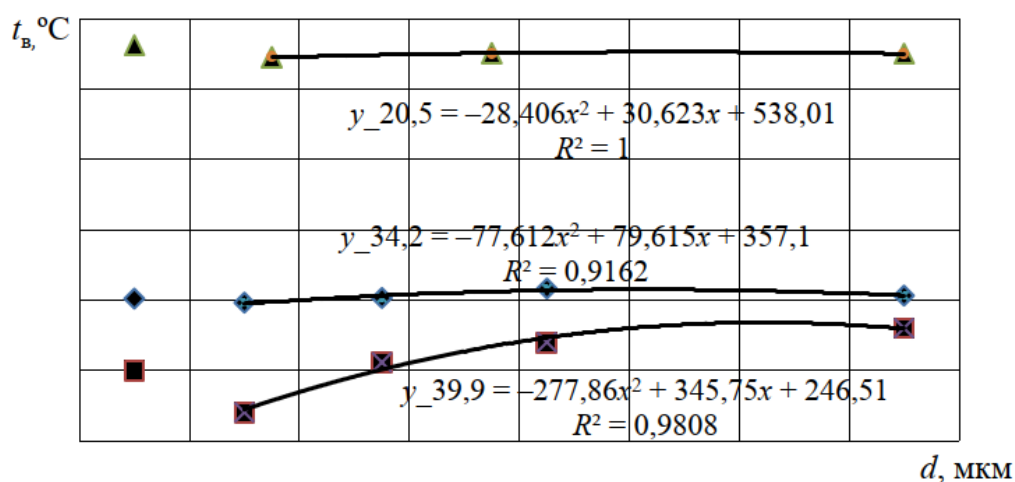


Рис. 1. Значения температуры воспламенения различных фракций угольной пыли:

▲ – $V^{daf} = 20,5\%$; ♦ – $V^{daf} = 34,2\%$; ■ – $V^{daf} = 39,9\%$

При исследовании температуры воспламенения самой крупной (750 мкм) и самой мелкой фракций (50 мкм) с высокой долей достоверности установлены зависимости этого показателя от выхода летучих веществ следующего вида (рис. 2):

$$- 50 \text{ мкм: } t_g = 979,5 \exp(-0,028 V^{daf}), R^2 = 0,999; \quad (1)$$

$$- 750 \text{ мкм: } t_g = 979,5 \exp(-0,684 V^{daf}), R^2 = 0,992. \quad (2)$$

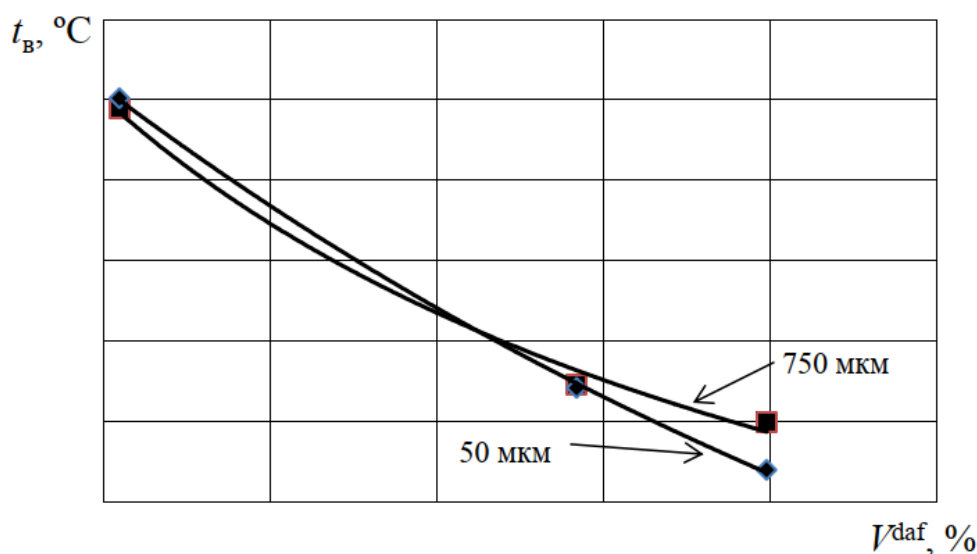


Рис. 2. Зависимость температуры воспламенения угольной пыли от выхода летучих веществ

Анализ зависимостей (1) и (2) показывает, что при термодеструкции угля на температуру воспламенения угольной пыли помимо выхода летучих оказывает некоторое влияние и размер его частиц. Различие в температуре воспламенения между крупными и мелкими фракциями угольной пыли имеет тенденцию к возрастанию с уменьшением размеров угольной пыли. Этот эффект может оказать значительное влияние на оценку пожаровзрывоопасности наночастиц угольной пыли по температуре ее воспламенения.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Полученные результаты экспериментального исследования угля марок ОС, Жк и Г свидетельствуют о значительном влиянии стадии метаморфизма угольных частиц на их пожаровзрывоопасные свойства: увеличение выхода летучих веществ приводит к понижению температуры воспламенения.

Однако для различных фракций угольных частиц всех стадий метаморфизма отмечено существенное повышение температуры воспламенения для крупных частиц и, наоборот, снижение для мелких частиц в зависимости от выхода летучих веществ, которое не совсем соответствует общему характеру полученных зависимостей температуры воспламенения фракций угольной пыли от ее размера. Эти данные могут свидетельствовать о некотором изменении изучаемого процесса и, соответственно, механизма самовоспламенения мелких фракций пылегазовых аэрозолей и аэрогелей.

Установленные зависимости температуры воспламенения частиц угольной пыли показывают необходимость проведения дальнейших исследований пожаровзрывоопасности наночастиц угля.

Список литературы / References

1. Результаты шахтных исследований интенсивности пылеотложений по сети горных выработок / Д. А. Трубицына, А. А. Анисимов, Д. С. Хлудов [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности : научно-технический журнал. – Кемерово, 2014. – № 1. – С. 68 – 74.

Trubitsyna D. A., Anisimov A. A., Khludov D. S., Olennikov S. V., Trubitsyna N. V. *Rezultaty shakhtnykh issledovaniy intensivnosti pyleotlozheniy po seti gornykh vyrabotok* [Results of the mine investigations of intensity of dust accumulations along the network of mine workings]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti : scientific and technical journal*. Kemerovo, 2014, no. 1, pp. 68-74. (In Russian)

2. Булгаков, Ю. Ф. Пылевая опасность угольного производства / Ю. Ф. Булгаков, В. Л. Овчаренко ; под общ. ред. Ю. Ф. Булгакова. – Донецк : Цифровая типография, 2017. – 234 с.

Bulgakov Yu. F., Ovcharenko V. L.; Yu. F. Bulgakov [ed.]. *Pylevaya opasnost ugolnogo proizvodstva* [Dust hazard of coal mining production]. Donetsk, ООО “Tsifrovaya tipografiya” Publ., 2017, 234 p. (In Russian)

3. Игишев, В. Г. Профилактика самовозгорания угольной пыли с применением твердого аэрозоля / В. Г. Игишев, С. А. Син, И. Д. Карлов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности : научно-технический журнал. – Кемерово, 2013. – № 1 – 2. – С. 85 – 87.

Igishev V. G., Sin S. A., Karlov I. D. *Profilaktika samovozgoraniya ugolnoy pyli s primeneniym tyvordogo aerolya* [Prevention of spontaneous combustion of coal dust applying the solid aerosol]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoy promyshlennosti : scientific and technical journal*. Kemerovo, 2013, no. 1-2, pp. 85-87. (In Russian)

4. Калякин, С. А. Анализ пожаровзрывоопасности угольной пыли / С. А. Калякин // Горноспасательное дело : сборник научных трудов / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 27 – 35.

Kalyakin S. A. *Analiz pozharovzryvoopasnosti ugolnoy pyli* [Analysis of fire and explosion safety of coal dust]. *Gornospasatelnoye delo : collection of scientific papers of the NIIGD "Respirator"*. Donetsk, 2012, issue 49, pp. 27-35. (In Russian)

5. Исмагилов З.Р. Химические основы безопасности в угольных шахтах. Самовозгорание и взрываемость угля / З. Р. Исмагилов, Ч. Н. Барнаков, С. Н. Вершинин // Сборник материалов II Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы производства кокса и переработки продуктов коксования» (Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева, 28 мая 2014 г.). – Кемерово, 2014. – С. 33 – 36.

Ismagilov Z. R., Barnakov Ch. N., Vershinin S. N. *Khimicheskiye osnovy bezopasnosti v ugolnykh shakhtakh. Samovozgoraniye i vzryvayemost uglya* [Chemical principles of safety in coal mines. Spontaneous combustion and explosiveness of coal]. *Sbornik materialov II Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennyye problemy proizvodstva koksa i pererabotki produktov koksovaniya"*. Kemerovo, Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet imeni T. F. Gorbacheva Press, 2014, p. 33. (In Russian)

6. Мунц, В. А. Горение и конверсия органических топлив / В. А. Мунц, В. Н. Королев. – Екатеринбург : УрФУ, 2016. – 244 с.

Munts V. A., Korolyov V. N. *Goreniye i konversiya organicheskikh topliv* [Combustion and conversion of organic fuels]. Yekaterinburg, UrFU Press, 2016, 244 p. (In Russian)

7. Портола, В. А. Оценка концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли / В. А. Портола // Вестник Кузбасского национального политехнического университета. – 2016. – № 5. – С. 17 – 21.

Portola V. A. *Otsenka kontsentratsionnykh predelov vzryvchatosti ugolnoy pyli* [Assessment of concentration limits of coal dust explosibility]. *Vestnik Kuzbasskogo natsionalnogo politekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 5, pp. 17-21. (In Russian)

Stanislav Aleksandrovich Kalyakin, Dr. Sci. (Tech.), professor; e-mail: yglenit@gmail.com

State Educational Institution of Higher Professional Education

“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 949) 399-14-71

Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, head of department; e-mail: ennio_80@mail.ru;

Mikhail Aleksandrovich Belokobylskiy, engineer; e-mail: obep.niigd@list.ru

State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”

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

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-79-07

DEPENDENCE OF COAL DUST COMBUSTION TEMPERATURE ON VOLATILE SUBSTANCES EMISSION

Purpose. Determination of dependence between the dust of different metamorphic grade coal combustion temperature and the volatile substances emission from the surface of coal particles and gas-kinetic factors in order to improve the fire safety of conducted mining works.

Methods. Experimental investigations of the degree of coal dust particles combustion.

Results. The conducted investigations have made it possible to establish the dependence of the temperature of coal dust of different metamorphic grades on the volatile substances emission and coal dust dimensions.

Scientific novelty. The novel polynomial dependences of the combustion temperature from the volatile substances emission have been established for the different fractions of coal dust; the dependences show the significant effect of the nanoparticles on fire and explosion hazard of the coal dust.

Practical value. The derived dependences of the combustion temperature of the coal dust particles permit to improve significantly the precision of estimation of the fire and explosion hazardous characteristics of the nanoparticles of coal dust of different metamorphic grades and the fire safety of conducting the mining works.

Keywords: *nanoparticle; coal dust; fire and explosion hazard; combustion temperature; spontaneous combustion temperature; volatile substances emission.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 621.311.1.019.3

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

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

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

Любовь Ивановна Колесник, канд. техн. наук, доц.; e-mail: lyu2630@yandex.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Донецкий национальный университет»

283001, Донецк, ул. Университетская, 24. Тел.: (+7 949) 379-19-20

РАСЧЕТ НАДЕЖНОСТИ И ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ СЛОЖНЫХ ПО СТРУКТУРЕ ВОССТАНАВЛИВАЕМЫХ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ СИСТЕМ

Цель. Разработать метод оценки надежности и пожаробезопасности структурно-сложных восстанавливаемых в процессе эксплуатации систем электроснабжения потребителей электрической энергии, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

Методы. Использован новый способ преобразования логического «треугольника» в эквивалентную по надежности логическую «звезду» и трансформации ее в эквивалентный по надежности «треугольник» для приведения сложных по структуре схем замещения систем электроснабжения к одному эквивалентному по надежности элементу.

Результаты. Разработан инженерный метод преобразования сложной по структуре схемы замещения систем электроснабжения потребителей электрической энергии к одному эквивалентному по надежности элементу, что позволит в дальнейшем оценить надежность и пожаробезопасность узлов нагрузки, используя известные формулы.

Научная новизна. Используя разработанный способ преобразования («треугольник – звезда» и «звезда – треугольник») для сложных по структуре схем замещения систем электроснабжения потребителей электрической энергии, представляется возможным получить новые аналитические зависимости, которые характеризуют надежность и пожаробезопасность узлов нагрузки.

Практическая значимость. Получен простой в использовании инженерный метод для оценки надежности и пожаробезопасности узлов нагрузки системы электроснабжения потребителей электрической энергии, при условии, что каждый ее элемент может находиться в трех несовместных состояниях.

Ключевые слова: сложная по структуре схема замещения; надежность; пожаробезопасность; узел нагрузки; обрыв цепи; короткое замыкание; отказ в срабатывании.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Пусть задана сложная по структуре схема замещения систем электроснабжения потребителей электрической энергии (далее – СЭС) для оценки ее надежности и пожаробезопасности. Элементы схемы замещения СЭС могут находиться в трех несовместных состояниях: работоспособном, неработоспособном – отказ «обрыв цепи», неработоспособном – отказ «короткое замыкание». Поток отказов и восстановлений элементов СЭС – простейшие (пуассоновские).

Пропускная способность элементов неограниченная, так же, как и способность сдерживать поток энергии независимо от количества короткозамкнутых элементов. После выхода из строя элемента СЭС его обнаруживают, восстанавливают работоспособность (ремонтируют или заменяют на новый) за конечный интервал времени.

Предполагается, что после обнаружения и восстановления вышедшего из строя элемента СЭС его характеристики надежности остаются такими же, какими они были и до его повреждения.

В схеме замещения СЭС выделены узлы: «вход» A и «выход» A_k (k – номер узла в схеме замещения). Число узлов в схеме замещения СЭС конечно.

Каждый элемент схемы замещения СЭС характеризуется следующими параметрами его надежности:

λ_{0i} – интенсивность аварийного отключения (средствами автоматической защиты либо вручную) i -го элемента СЭС (отказ «обрыв цепи»);

μ_{0i} – интенсивность обнаружения и введения в работу i -го аварийно отключившегося элемента СЭС;

λ_{si} – интенсивность появления отказов («короткое замыкание» в i -м элементе СЭС);

μ_{si} – интенсивность выявления повреждений в автоматической системе отключения i -го элемента, его устранения и введения в работу.

Индексы «0» и «s» указывают на то, что учитываются повреждения i -го элемента схемы замещения СЭС, которые приводят к отказам «обрыв цепи» или к отказам «короткое замыкание» соответственно.

Необходимо определить:

$P(t)$ – вероятность того, что в течение времени t не произойдет такое случайное событие, в результате которого разрывается связь или проходит неотключаемый защитой сквозной аварийный ток КЗ между «входным» и «выходным» узлами схемы замещения СЭС, при условии, что в начальный момент времени все ее элементы находились в работоспособном состоянии;

$q_0(t)$ – вероятность того, что в течение времени t произойдет такое случайное событие, в результате которого будет прервана связь между узлами «вход» и «выход» схемы замещения СЭС;

$q_s(t)$ – вероятность того, что в течение времени t произойдет такое случайное событие, в результате которого через узлы «вход» и «выход» схемы замещения пройдет сквозной неотключаемый защитой аварийный ток КЗ.

Поставленная задача является актуальной, так как ее решение позволит ответить на вопрос: надежна и пожаробезопасна ли спроектированная СЭС.

Анализ последних исследований и публикаций. Система электроснабжения предприятия представляет собой совокупность источников электроэнергии, распределительных и пусковых устройств и кабельной сети и предназначена для бесперебойного обеспечения потребителей электрической энергией определенного качества [1].

На этапе проектирования сложных систем основными задачами является построение рациональной структуры и определение алгоритма ее функционирования [2, 3].

Для оценки надежности и пожаробезопасности узлов нагрузки сложных по структуре восстанавливаемых СЭС, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях, известен метод «минимальные сечения», основанный на построении схем замещения СЭС [4].

В данной работе предлагается сложную по структуре схему замещения СЭС при учете, что каждый ее элемент может находиться в трех несовместных состояниях, свести к одному эквивалентному по надежности элементу, используя способ преобразования структур «треугольник – звезда» или «звезда – треугольник» с учетом восстановления вышедших из строя элементов сети.

Цель исследования – разработать метод оценки надежности и пожаробезопасности структурно-сложных восстанавливаемых в процессе эксплуатации систем электроснабжения потребителей электрической энергии, элементы которых могут находиться в трех несовместных состояниях.

Результаты исследований. Под сложной по структуре схемой замещения СЭС, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях, будем понимать систему, в состав которой входит хотя бы одна группа элементов, соединенных в виде логической «звезды» или «треугольника».

Для приведения сложных по структуре схем замещения СЭС к простым используют способы преобразования «треугольник – звезда» и «звезда – треугольник».

Суть преобразования «треугольник – звезда» состоит в том, что в схеме замещения сложной по структуре СЭС соединения элементов в виде «треугольника» заменяются на эквивалентные по надежности соединения элементов в виде «звезды».

На рис. 1а, б изображены две схемы замещения соединения элементов в виде «треугольника» и «звезды» соответственно.

Пусть заданы интенсивности отказов $\lambda_{0x}, \lambda_{0y}, \lambda_{0z}$ и восстановлений $\mu_{0x}, \mu_{0y}, \mu_{0z}$ элементов логического «треугольника» (рис. 1а), тогда эквивалентные по надежности интенсивности отказов $\lambda_{0i}, \lambda_{0j}, \lambda_{0k}$ и восстановлений $\mu_{0i}, \mu_{0j}, \mu_{0k}$ логической «звезды» (рис. 1б) находим из следующих рассуждений.

Узел А логической «звезды» будет функционировать идентично логическому узлу А «треугольника», если интенсивности отказов и восстановлений элемента «i» будут равны интенсивностям отказов и восстановлений двух параллельно соединенных элементов x и y логического «треугольника» для случая, когда учитываются отказы его элементов – «обрыв цепи» (рис. 1а, б).

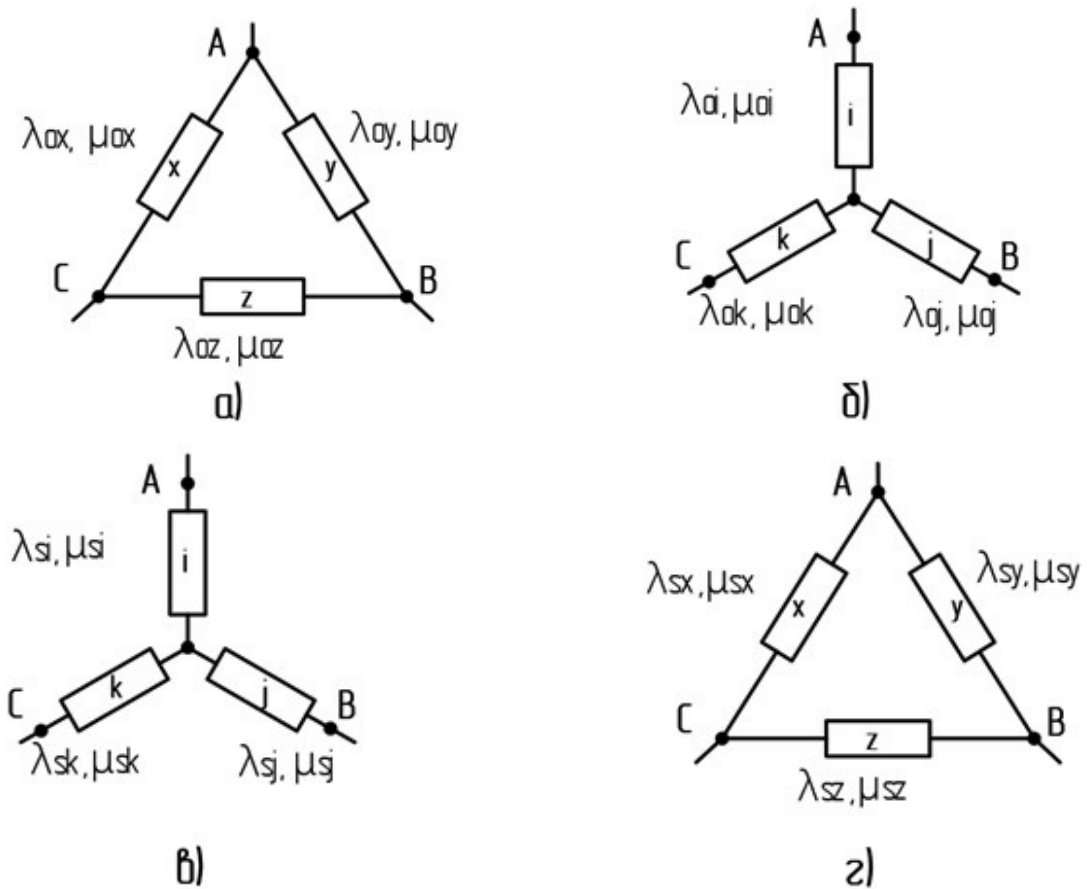


Рис. 1. Способ преобразования соединений «треугольник – звезда» и «звезда – треугольник», если имеют место два вида несовместных отказов их элементов («обрыв цепи» и «короткое замыкание»), с учетом их восстановления

Аналогичные рассуждения можно привести и для узлов B и C логического «треугольника» и «звезды».

Используя рис. 1а, б, формулы для нахождения эквивалентных интенсивностей отказов и восстановлений для двух параллельно соединенных элементов [5], получаем следующие формулы:

$$\lambda_{oi} = \frac{\lambda_{ox}\lambda_{oy}(\mu_{ox} + \mu_{oy})}{\mu_{ox}\mu_{oy}};$$

$$\mu_{oi} = \mu_{ox} + \mu_{oy};$$

$$\lambda_{oj} = \frac{\lambda_{oy}\lambda_{oz}(\mu_{oy} + \mu_{oz})}{\mu_{oy}\mu_{oz}};$$

$$\mu_{oj} = \mu_{oy} + \mu_{oz};$$
(1)

$$\lambda_{0k} = \frac{\lambda_{0x}\lambda_{0z}(\mu_{0x} + \mu_{0z})}{\mu_{0x}\mu_{0z}};$$

$$\mu_{0k} = \mu_{0x} + \mu_{0z}.$$

В случае, если известны характеристики надежности элементов логической «звезды» (рис. 1б), то есть λ_{0i} , λ_{0j} , λ_{0k} и μ_{0i} , μ_{0j} , μ_{0k} , и необходимо получить эквивалентные по надежности характеристики логического «треугольника» (рис. 1а), то есть λ_{0x} , λ_{0y} , λ_{0z} , тогда из формулы (1) находим

$$\begin{aligned}\lambda_{0x} &= 0,5 \left(\frac{\lambda_{0k}\lambda_{0i}\mu_{0j}}{\mu_{0k}\mu_{0i}\lambda_{0j}} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu_{0k} + \mu_{0i} - \mu_{0j}); \\ \mu_{0x} &= 0,5(\mu_{0k} + \mu_{0z} - \mu_{0i}); \\ \lambda_{0y} &= 0,5 \left(\frac{\lambda_{0i}\lambda_{0j}\mu_{0k}}{\mu_{0i}\mu_{0j}\lambda_{0k}} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu_{0i} + \mu_{0j} - \mu_{0k}); \\ \mu_{0y} &= 0,5(\mu_{0i} + \mu_{0j} - \mu_{0k}); \\ \lambda_{0z} &= 0,5 \left(\frac{\lambda_{0k}\lambda_{0j}\mu_{0i}}{\mu_{0k}\mu_{0j}\lambda_{0i}} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu_{0k} + \mu_{0j} - \mu_{0i}); \\ \mu_{0z} &= 0,5(\mu_{0k} + \mu_{0j} - \mu_{0i}).\end{aligned}\tag{2}$$

Формулы (1) и (2) используют в том случае, если выполняются условия:

$$\begin{aligned}\lambda_{0x} &\leq 0,01\mu_{0x}; \lambda_{0y} \leq 0,01\mu_{0y}; \lambda_{0z} \leq 0,01\mu_{0z}; \\ \mu_{0k} + \mu_{0i} &> \mu_{0j}; \lambda_{0k}\lambda_{0i}\mu_{0j} < \mu_{0k}\mu_{0i}\lambda_{0j}; \\ \mu_{0j} + \mu_{0i} &> \mu_{0k}; \lambda_{0i}\lambda_{0j}\mu_{0k} < \mu_{0i}\mu_{0j}\lambda_{0k}; \\ \mu_{0k} + \mu_{0j} &> \mu_{0i}; \lambda_{0k}\lambda_{0j}\mu_{0i} < \mu_{0k}\mu_{0j}\lambda_{0i}.\end{aligned}\tag{3}$$

В случае, если элементы логической «звезды» (рис. 1в) подвержены отказам типа «короткое замыкание» и известны их интенсивности отказов и восстановления: $\lambda_{si}, \lambda_{sj}, \lambda_{sk}, \mu_{si}, \mu_{sj}, \mu_{sk}$, то интенсивности отказов и восстановления эквивалентных по надежности элементов логического «треугольника» $\lambda_{sx}, \lambda_{sy}, \lambda_{sz}, \mu_{sx}, \mu_{sy}, \mu_{sz}$ (рис. 1г) определяют по формулам

$$\begin{aligned}
\lambda_{sx} &= \frac{\lambda_{si}\lambda_{sk}(\mu_{si} + \mu_{sk})}{\mu_{si}\mu_{sk}}; \\
\mu_{sx} &= \mu_{si} + \mu_{sk}; \\
\lambda_{sy} &= \frac{\lambda_{si}\lambda_{sj}(\mu_{si} + \mu_{sj})}{\mu_{si}\mu_{sj}}; \\
\mu_{sy} &= \mu_{si} + \mu_{sj}; \\
\lambda_{sz} &= \frac{\lambda_{sk}\lambda_{sj}(\mu_{sk} + \mu_{sj})}{\mu_{sk}\mu_{sj}}; \\
\mu_{sz} &= \mu_{sk} + \mu_{sj}.
\end{aligned} \tag{4}$$

В том случае, если заданы интенсивности отказов λ_{sx} , λ_{sy} , λ_{sz} логического «треугольника» (рис. 1г), а необходимо получить эквивалентные по надежности элементы логической «звезды», то есть λ_{si} , λ_{sj} , λ_{sk} и μ_{si} , μ_{sj} , μ_{sk} , то следует воспользоваться формулами (3), из которых получаем формулы

$$\begin{aligned}
\lambda_{si} &= 0,5 \left(\frac{\lambda_{sx}\lambda_{sy}\mu_{sz}}{\mu_{sx}\mu_{sy}\lambda_{sz}} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu_{sy} + \mu_{sx} - \mu_{sz}); \\
\mu_{si} &= 0,5(\mu_{sy} + \mu_{sx} - \mu_{sz}); \\
\lambda_{sj} &= 0,5 \left(\frac{\lambda_{sy}\lambda_{sz}\mu_{sx}}{\mu_{sy}\mu_{sz}\lambda_{sx}} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu_{sy} + \mu_{sz} - \mu_{sx}); \\
\mu_{sj} &= 0,5(\mu_{sy} + \mu_{sz} - \mu_{sx}); \\
\lambda_{sk} &= 0,5 \left(\frac{\lambda_{sx}\lambda_{sz}\mu_{sy}}{\mu_{sx}\mu_{sz}\lambda_{sy}} \right)^{\frac{1}{2}} (\mu_{sx} + \mu_{sz} - \mu_{sy}); \\
\mu_{sk} &= 0,5(\mu_{sx} + \mu_{sz} - \mu_{sy}).
\end{aligned} \tag{5}$$

Формулы (4) и (5) справедливы при выполнении следующих условий:

$$\begin{aligned}
\lambda_{sx} &\leq 0,01\mu_{sx}; \lambda_{sy} \leq 0,01\mu_{sy}; \lambda_{sz} \leq 0,01\mu_{sz}; \\
\mu_{sy} + \mu_{sx} &> \mu_{sz}; \lambda_{sx}\lambda_{sy}\mu_{sz} < \mu_{sx}\mu_{sy}\lambda_{sz}; \\
\mu_{sy} + \mu_{sz} &> \mu_{sx}; \lambda_{sy}\lambda_{sz}\mu_{sx} < \mu_{sy}\mu_{sz}\lambda_{sx};
\end{aligned} \tag{6}$$

$$\mu_{sx} + \mu_{sz} > \mu_{sy}; \lambda_{sx} \lambda_{sz} \mu_{sy} < \mu_{sx} \mu_{sz} \lambda_{sy}.$$

Используя формулы (1), (2), (4) и (5) и формулы, приведенные в [5], для определения эквивалентных по надежности элементов для систем, которые состоят из логически последовательного или параллельного их соединения, любую сложную (по определению) СЭС возможно привести к одному эквивалентному элементу с параметрами λ_0 , μ_0 , λ_s , μ_s .

Используя формулы, приведенные в [6], находим $P(t)$, $q_0(t)$, $q_s(t)$, $q(t)$, $P(\infty)$.

Пример. Задана схема замещения СЭС (рис. 2). В таблице приведены параметры надежности элементов схемы замещения СЭС.

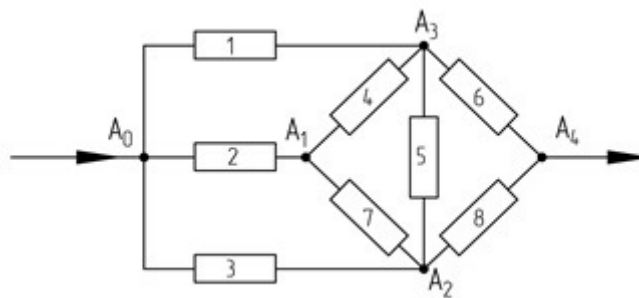


Рис. 2. Схема замещения СЭС, составленная для оценки надежности электроснабжения узла нагрузки A_4

Таблица
Параметры надежности элементов схемы замещения СЭС

i	$\lambda_{0i}, \text{ч}^{-1}$	$\mu_{0i}, \text{ч}^{-1}$	$\lambda_{si}, \text{ч}^{-1}$	$\mu_{si}, \text{ч}^{-1}$
1	0,000036	0,56	0,000038	0,48
2	0,000048	0,43	0,000028	0,56
3	0,000057	0,91	0,000028	0,43
4	0,000067	0,45	0,000028	0,41
5	0,000095	0,38	0,000038	0,32
6	0,000076	0,59	0,000048	0,45
7	0,000110	0,67	0,000057	0,59
8	0,000048	0,84	0,000038	0,67

Определить коэффициент готовности $P(\infty)$ узла нагрузки A_4 , от которого получают электроэнергию потребители.

Решение. Используя схему замещения СЭС (рис. 2), логическую «звезду» с узлами A_0 , A_1 , A_2 , A_3 преобразуем в эквивалентный по надежности логический «треугольник» с узлами A_0 , A_2 , A_3 (рис. 3а).

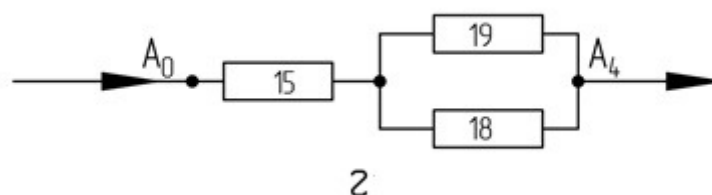
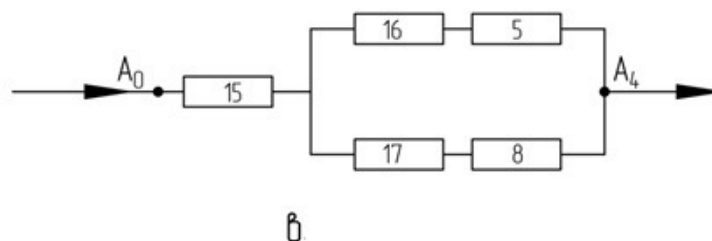
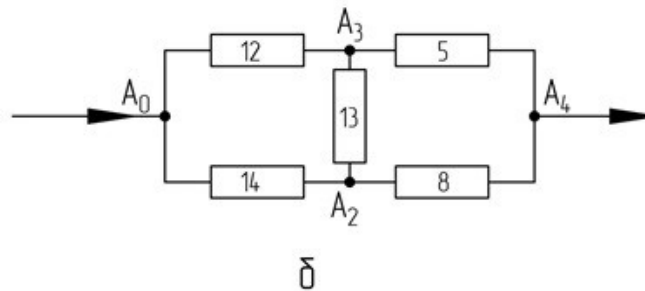
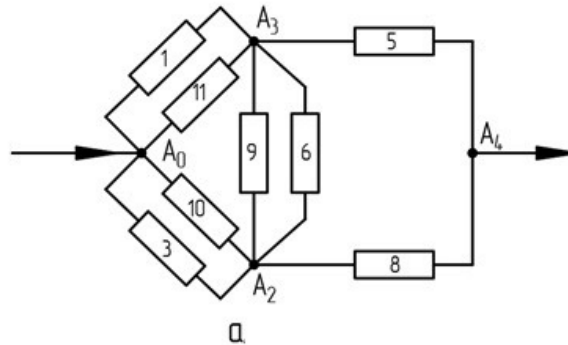
Эквивалентные по надежности интенсивности отказов и восстановлений логического «треугольника» находим, используя формулы (2) и (4), а также исходные данные из таблицы.

В результате преобразований получаем

$$\begin{aligned}\lambda_{09} &= 4,87 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}; \mu_{09} = 0,345 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s9} = 6,83 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s9} = 0,99 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{010} &= 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}; \mu_{010} = 0,325 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s10} = 5,66 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s10} = 0,99 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{011} &= 3,43 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}; \mu_{011} = 0,105 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s11} = 3,48 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s11} = 0,96 \text{ ч}^{-1}.\end{aligned}$$

Параллельно соединенные элементы логического «треугольника» (рис. 3а) заменим эквивалентными по надежности элементами 12, 13 и 14 соответственно (рис. 3б). Интенсивности отказов и восстановлений эквивалентных элементов находим, используя формулы, приведенные в [5]. Получаем

$$\begin{aligned}\lambda_{012} &= 1,06 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}; \mu_{012} = 0,66 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s12} = 3,8 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s12} = 0,48 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{013} &= 1,7 \cdot 10^{-6} \text{ ч}^{-1}; \mu_{013} = 0,935 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s13} = 4,76 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s13} = 0,45 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{014} &= 8,18 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}; \mu_{014} = 1,23 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s14} = 2,485 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s14} = 0,56 \text{ ч}^{-1}.\end{aligned}$$



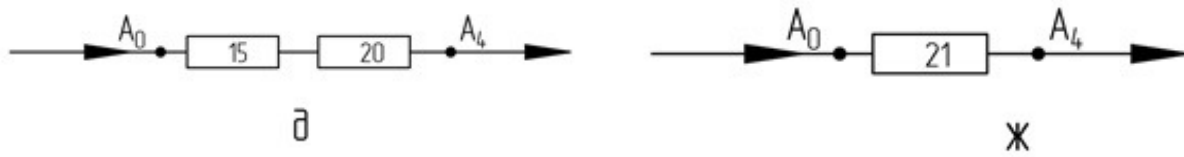


Рис. 3. Способ преобразования сложной по структуре схемы замещения СЭС для оценки надежности электроснабжения узла нагрузки A_4

Логический «треугольник» с узлами A_0 , A_2 , A_3 (рис. 3б) заменим на эквивалентную по надежности «звезду», используя формулы (1) и (5), и найдем параметры эквивалентных по надежности ее элементов

$$\begin{aligned}\lambda_{015} &= 1,99 \cdot 10^{-12} \text{ ч}^{-1}; \mu_{015} = 1,89 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s15} = 1,82 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s15} = 0,295 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{016} &= 4,49 \cdot 10^{-12} \text{ ч}^{-1}; \mu_{016} = 1,96 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s16} = 2,37 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s16} = 0,185 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{017} &= 3,6 \cdot 10^{-12} \text{ ч}^{-1}; \mu_{017} = 2,2 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s17} = 2,18 \cdot 10^{-3} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s17} = 0,265 \text{ ч}^{-1}.\end{aligned}$$

В результате описанного выше преобразования сложная по структуре схема замещения (рис. 3б) примет вид (рис. 2в). Используя формулы, приведенные в [5], находим интенсивности отказов и восстановлений эквивалентных по надежности элементов 18, 19, 20 и 21 (рис. 3г, д, ж), которые принимают следующие значения:

$$\begin{aligned}\lambda_{018} &= 4,76 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}; \mu_{018} = 0,84 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s18} = 4,36 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s18} = 0,935 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{019} &= 9,51 \cdot 10^{-5} \text{ ч}^{-1}; \mu_{019} = 0,38 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s19} = 7,6 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s19} = 0,505 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_{020} &= 1,73 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}; \mu_{020} = 1,22 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s20} = 11,96 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s20} = 0,61 \text{ ч}^{-1}. \\ \lambda_{021} &= 1,73 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}; \mu_{021} = 1,22 \text{ ч}^{-1}; \lambda_{s21} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}; \mu_{s21} = 0,905 \text{ ч}^{-1}.\end{aligned}$$

В нашем случае

$$\begin{aligned}\lambda_0 &= \lambda_{021} = 1,73 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}; \mu_0 = \mu_{021} = 1,22 \text{ ч}^{-1}; \\ \lambda_s &= \lambda_{s21} = 1,1 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}; \mu_s = \mu_{s21} = 0,905 \text{ ч}^{-1}.\end{aligned}$$

Подставив найденные значения λ_0 , μ_0 , λ_s , μ_s в формулу для расчета коэффициента готовности [6]

$$K_r = \frac{\mu_0 \mu_s}{\mu_0 \mu_s + \lambda_0 \mu_s + \lambda_s \mu_0},$$

находим $K_r = 0,999999$.

Аналогичный результат был получен при представлении схемы замещения СЭС (рис. 2) в виде двух расчетных схем «минимальных сечений» и последующего использования методики расчета, приведенной в [4].

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Получена новая инженерная методика расчета надежности структурно-сложных систем, с помощью которой можно оценить надежность и пожаробезопасность узлов нагрузки восстанавливаемых систем электроснабжения потребителей электрической энергии, элементы которой могут находиться в трех несовместных состояниях. Предлагаемая нами методика отличается от известных тем, что не требует составления схем замещения минимальных сечений, а для расчета используется принципиальная схема электроснабжения.

В дальнейшем следует разработать инженерную методику по сбору и обработке статистического материала для получения параметров надежности элементов, входящих в схему замещения конкретной системы электроснабжения потребителей.

Список литературы / References

1. Ванеев, Б. Н. Эффективность мостиковых систем электроснабжения / Б. Н. Ванеев // Взрывозащищенное электрооборудование : сборник научных трудов ГУ «НИИВЭ». – Донецк : Типография Восток Пресс, 2017. – № 1(52). – С. 119 – 126.

Vaneyev B. N. *Effektivnost mostikovykh sistem elektrosnabzheniya* [Efficiency of bridge power supply systems]. *Vzryvozashchishchennoe elektrooborudovaniye* : collection of scientific papers of the GU “NIIVE”. Donetsk, Vostok Press Publ., 2017, no. 1(52), pp. 119-126. (In Russian)

2. Рябинин, И. А. Надежность, живучесть и безопасность корабельных электроэнергетических систем / И. А. Рябинин, Ю. М. Парфенов. – Санкт-Петербург : ВМА, 1997. – 431 с.

Ryabinin I. A., Parfenov Yu. M. *Nadezhnost, zhivuchest i bezopasnost korabelnykh elektroenergeticheskikh sistem* [Dependability, resilience and safety of ship electric power systems]. St. Petersburg, VMA Publ., 1997, 431 p. (In Russian)

3. Рябинин, И. А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем / И. А. Рябинин. – Санкт-Петербург : Изд-во Санкт-Петербургского университета, 2007. – 276 с.

Ryabinin I. A. *Nadezhnost i bezopasnost strukturno slozhnykh sistem* [Dependability and safety of structurally complex systems]. St. Petersburg, Sankt-Peterburgskiy universitet Press, 2007, 276 p.

4. Ковалев, А. П. Построение схем замещения сложных по структуре восстанавливаемых систем для оценки их надежности и пожаробезопасности / А. П. Ковалев, Л. И. Колесник // Научный вестник НИИ «Респиратор». – 2022. – № 4(59). – С. 26 – 36.

Kovalyov A. P., Kolesnik L. I. *Postroyeniye skhem zameshcheniya slozhnykh po strukture vosstanavlivayemykh sistem dlya otsenki ikh nadyozhnosti*

i požarobezopasnosti [Plotting the equivalent circuit of structurally complex restorable systems for assessment of their dependability and fire safety]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2022, no. 4(59), pp. 26-36. (In Russian)

5. Ковалев, А. П. Оценка надежности электроснабжения узлов нагрузки сложной по структуре восстанавливаемой системы с учетом двух видов несовместных отказов электрооборудования / А. П. Ковалев // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – 2021. – № 2(58). – С. 78 – 89.

Kovalyov A. P. *Otsenka nadezhnosti elektrosnabzheniya uzlov nagruzki slozhnoy po strukture vosstanavlivayemoy sistemy s uchetom dvukh vidov nesovmestnykh otkazov elektrooborudovaniya* [Estimation of reliability of electric power supply of load nodes of structurally complex recoverable system factoring in two types of incompatible electrical equipment failures]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2021, no. 2(58), pp. 78-89. (In Russian)

6. Ковалев, А. П. Надежность защитных коммутационных аппаратов / А. П. Ковалев, В. В. Якимишина, О. А. Сапоненко // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – 2020. – № 2(57). – С. 96 – 106.

Kovalyov A. P., Yakimishina V. V., Saponenko O. A. *Nadyozhnost zashchitnykh kommutatsionnykh apparatov* [Reliability of protective switching devices]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*, 2020, no. 2(57), pp. 96-106. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В. В. Мамаевым
Дата поступления рукописи 14.03.2023
Дата опубликования 17.03.2023

Aleksandr Petrovich Kovalyov, Dr. Sci. (Tech.), professor, scientific associate; e-mail: abrecap@mail.ru
State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"
of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"

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

Lyubov Ivanovna Kolesnik, Cand. Sci. (Tech.), assistant professor; e-mail: lyu2630@yandex.ru

State Educational Institution of Higher Professional Education

"Donetsk National University"

283001, Donetsk, 24, ulitsa Universitetskaya. Phone: (+7 949) 379-19-20

CALCULATION OF DEPENDABILITY AND FIRE SAFETY OF STRUCTURALLY COMPLEX RESTORABLE IN PROCESS OF OPERATION SYSTEMS

Purpose. To develop a method for assessment of dependability and fire safety of structurally complex restorable in operation systems supplying power to the electrical power consumers, the elements of these systems may operate in three incompatible states.

Methods. The novel method of transforming the logical "triangle" into equally reliable logical "star" and turning it into equally reliable "triangle" in order to reduce the structurally complex circuits substituting the systems of power supply to one equally reliable element.

Results. The engineering method for transforming the structurally complex circuit substituting the systems of power supply to electrical power consumers into one equally reliable element which will make it possible to further assess the dependability and fire safety of load nodes applying the known formula.

Scientific novelty. Applying the developed method (“triangle–star” and “star–triangle”) for transforming structurally complex circuits substituting the systems of power supply to electrical power consumers it turns out to be possible to derive new analytical dependences which characterize the dependability and fire safety of the load nodes.

Practical novelty. The simple and user friendly engineering method has been composed for assessing the dependability and fire safety of the load nodes of the system for power supply to electrical power consumers under condition that every single element of this system may operate in three incompatible states.

Keywords: *structurally complex substitution system; dependability; fire safety; load node; open-circuit fault; short circuit; miss operation.*

УДК 622.867.3 "Пункты"

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

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

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

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

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

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

СОВРЕМЕННЫЕ ТРЕБОВАНИЯ К ПУНКТАМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В РЕЗЕРВНЫЕ ШАХТНЫЕ САМОСПАСАТЕЛИ

Цель. Исследование возможности усовершенствования многоступенчатой системы эвакуации с использованием пунктов переключения в самоспасатели для повышения безопасности подземных работ на горнодобывающих предприятиях.

Методы. Аналитические методы исследований существующих средств коллективной защиты, применяемых при многоступенчатой системе эвакуации подземного персонала горнодобывающих предприятий.

Результаты. Установлены преимущества и недостатки существующих средств коллективной защиты, используемых на этапах многоступенчатой системы эвакуации шахтеров с аварийного участка.

Научная новизна. Рассмотрено функционирование современных систем самоспасения и средств коллективной защиты подземного персонала с позиций теории массового обслуживания.

Практическая значимость. Выполненные исследования позволили определить направления совершенствования средств коллективной защиты и систем самоспасения шахтеров.

Ключевые слова: дыхательный аппарат; шахтный самоспасатель; средство коллективной защиты органов дыхания; многоступенчатая система эвакуации; пункт переключения в резервные самоспасатели; эвакуационный маршрут.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Вопрос обеспечения безопасности ведения горных работ никогда не терял своей актуальности. Увеличение глубины ведения горных работ приводит к повышению сложности и опасности условий труда, росту нагрузки на забой, а также абсолютной и относительной метанообильности. Средний уровень относительной метанообильности в угольных шахтах России составляет 18,6 м³/т, а абсолютной – 50,6 м³/мин.

Большинство шахт России работает в сложных горно-геологических условиях, что повышает уровень риска возникновения крупных аварий с человеческими жертвами. Основные причины большинства таких аварий – взрывы метана, вызванные высокой метанообильностью отрабатываемых пластов, неустойчивыми схемами проветривания горных выработок в уклонных полях.

Увеличивающаяся протяженность эвакуационных маршрутов наряду с вышеуказанными факторами обуславливает необходимость применения на шахтах многоступенчатой системы эвакуации, поскольку время защитного действия состоящего на оснащении самоспасателя не обеспечивает выход шахтеров из аварийного участка в безопасную зону.

Поэтому при ведении подземных работ на участках с большой протяженностью аварийных маршрутов выхода применяют многоступенчатые системы самоспасения с последовательным переключением шахтеров в средства индивидуальной защиты органов дыхания, при размещении которых учитывают горнотехнические условия ведения работ в шахте, расположение рабочих мест шахтеров и другие факторы [1].

Анализ последних исследований и публикаций. Увеличение длины горных выработок обуславливает необходимость повышения времени защитного действия средств защиты органов дыхания человека, что пропорционально увеличивает их массогабаритные параметры. Учитывая необходимость постоянного ношения таких аппаратов, это представляется неприемлемым. Такой важный вопрос решается созданием и применением многоступенчатой системы эвакуации с применением СИЗОД различного времени защитного действия. Для постоянного ношения рекомендовались самоспасатели с временем защитного действия 20...30 мин.

При аварии этого времени было бы достаточно, чтобы шахтер, включившись в дыхательный аппарат, мог достигнуть пункта переключения с резервными самоспасателями. Для размещения пунктов переключения согласно рекомендациям по организации системы самоспасения горнорабочих при подземных авариях на угольных шахтах необходимо определить расстояние L , м, которое может преодолеть шахтер, включенный в самоспасатель, по формуле

$$L = V_n T_{з.д},$$

где V_n – средняя скорость передвижения горнорабочего в самоспасателе, м/мин;
 $T_{з.д}$ – время защитного действия самоспасателя, мин.

Среднюю скорость передвижения в самоспасателе в непригодной для дыхания среде при полной видимости и при задымлении принимают с учетом угла наклона и высоты горной выработки.

В пунктах переключения размещают контейнеры с автономной системой воздухоснабжения для шестерых шахтеров, а также не менее 15 резервных самоспасателей. Количество таких контейнеров зависит от количества самоспасателей, необходимых для переключения всех шахтеров, которые могут находиться в момент аварии в горной выработке. При этом учитывают численность тех шахтеров, которые выходят с аварийного участка на поверхность, а также тех, которые могут идти на свои рабочие места согласно

СОУ 10.1-00174102-002-2004. «Система самоспасения горняков. Общие требования».

Разрешается в пунктах переключения устанавливать дополнительные контейнеры с резервными самоспасателями в ящиках или в нишах.

На добычных участках при расчете маршрутов аварийного выхода учитывают длину откаточного (конвейерного) штрека, лавы и вентиляционного штрека до выхода на свежую струю воздуха.

На всех разрабатываемых пластах, склонных к внезапным выбросам угля, породы и газа, пункты переключения устанавливают на вентиляционном и откаточном (конвейерном) штреках на расстоянии не более 50 м от выхода из лавы.

Пункты переключения в самоспасатели (далее – ППС) согласно ГОСТ Р 70061-2022. «Оборудование горно-шахтное. Пункты переключения в самоспасатели. Общие технические требования = Mining. Change over station. General technical requirements: национальный стандарт Российской Федерации» классифицируют в зависимости от типа конструкции корпуса: модульного исполнения, имеющие сборно-разборную конструкцию, и контейнерного (цельного) исполнения.

В горных выработках такие пункты переключения размещают стационарно для длительной эксплуатации в специально пройденных или существующих горных выработках или мобильно на определенное время и перемещают в зависимости от смещения фронта ведения горных работ.

Цель исследования – исследование возможности усовершенствования многоступенчатой системы эвакуации с применением пунктов переключения в самоспасатели для повышения безопасности подземных работ на горнодобывающих предприятиях.

Результаты исследований. Согласно ГОСТ Р 70061-2022. «Оборудование горно-шахтное. Пункты переключения в самоспасатели. Общие технические требования = Mining. Change over station. General technical requirements: национальный стандарт Российской Федерации» в основной зоне пункта переключения резервные самоспасатели и системы жизнеобеспечения размещены на одной стороне, на противоположной стороне допускается располагать места для кратковременного отдыха.

Количество подземного персонала, одновременно находящегося в ППС, устанавливает предприятие-изготовитель. Рекомендуемые значения 6, 8, 10 и 12 человек с учетом установленного количества мест в ППС для одновременного переключения и кратковременного отдыха.

Количество резервных самоспасателей в ППС определяют, исходя из численности самой многочисленной смены, находящейся на маршруте во время выхода из отдаленных участков шахты в аварийных ситуациях с учетом 10 % безопасного резерва.

Время автономного снабжения воздухом для дыхания в ППС составляет не менее 90 мин, а расчетное время переключения одного человека не более 40 с.

Согласно требованиям данного стандарта таким способом обеспечивается возможность переключения подземного персонала в резервный самоспасатель в пригодной для дыхания среде и кратковременного (до 3...5 мин) отдыха, двери должны быть оборудованы концевыми выключателями с возможностью вывода информации об их положении на пульт диспетчеру шахты.

Система подачи сжатого воздуха в пункте переключения обеспечивает запас потребляемого воздуха в объеме не менее 0,1 м³/мин на одного человека. В качестве источника свежего воздуха применяют баллон вместимостью не менее 40 дм³.

Для регулирования расхода воздуха и продувки ППС предусмотрены панель управления и клапаны сброса избыточного давления. Направленный обдув воздухом сосредоточен в основной зоне ППС, где проводят переключения в резервные самоспасатели, и в области отдыха людей на высоте не менее 1,7 м. Включение обдува воздухом проводится в автоматическом режиме при открывании дверей ППС.

При разработке системы самоспасения и определении технических характеристик пунктов переключения учитывают время переключения, количество горнорабочих, одновременно подошедших к пункту переключения, количество свободных физических каналов (загубников) для переключения за единицу времени. Имея N физических каналов на пункте переключения, можно обеспечить в нем переключение N горнорабочих, но этого недостаточно.

Ограничивать число обслуживаемых горнорабочих количеством физических каналов явно нерационально, поскольку маловероятно, чтобы все они смогли воспользоваться пунктом переключения одновременно.

Следовательно, при N каналах можно обслуживать более N горнорабочих, однако возможна ситуация, когда шахтеры не смогут сразу воспользоваться загубником, поскольку все они будут заняты.

Очевидно, что время переключения в резервные самоспасатели шахтеров – случайная величина. Статистическая обработка полученных данных свидетельствует о том, что поток событий – последовательность событий, разделенных некоторыми интервалами времени, в нашем конкретном случае – поток подхода горнорабочих к пункту для переключения, является простейшим [2], а время переключения их в пункте распределено по нормальному закону [3]. Функционирование такой системы можно описать с помощью теории массового обслуживания.

Частоту подхода горнорабочих к пункту переключения, являющуюся случайной величиной, можно описать при помощи распределения Пуассона.

Вероятность P поступления k вызовов (дискретная случайная величина)

$$P_k = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t}, \quad \lambda t > 0, \quad k \geq 0,$$

где k – количество событий;

t – интервал времени, в течение которого возможно наступление событий, мин;

λ – математическое ожидание события – переключения в резервный самоспасатель.

Среднее количество запросов на переключение в интервале времени t равно

$$k = \lambda t.$$

Дисперсия числа вызовов D_k в этом интервале равна

$$D_k = \lambda t.$$

Функционирование пункта переключения в резервные самоспасатели можно описать с помощью модели Erlang C (система с ожиданием). Вероятность задержки (вероятность того, что поступивший вызов не обслуживается немедленно, а становится в очередь) P_c определяют по формуле

$$P_c = P_{0c} \frac{A^N \cdot N}{N!(N-A)}.$$

где N – количество воздухопроводов;

A – общий предлагаемый трафик (количество запросов на переключение в единицу времени) в модели Erlang C, предлагаемый для N воздухопроводов.

Вероятность того, что все каналы свободны, определяется по формуле

$$P_{0c} = \frac{1}{\sum_{n=0}^{N-1} \frac{A^n}{n!} + \frac{A^N \cdot N}{N!(N-A)}}.$$

Исходя из практики переключения шахтеров в резервные самоспасатели во время эвакуации с аварийного участка, при разработке аппарата спасательного передвижного АСП, выполняющего функцию пункта переключения в резервные самоспасатели, определили оптимальную конструкцию с шестью воздухопроводами. При этом вероятность одновременной занятости всех шести воздухопроводов чрезвычайно мала ($P_6 = 0,00004$) [3].

Разработанный НИИ «Респиратор» аппарат АСП имеет корпус в виде металлического контейнера сварной конструкции с дверьми, воздухопроводную систему, состоящую из дыхательного мешка с избыточным клапаном, шести гофрированных шлангов с загубниками, регенеративный патрон с кислородсодержащим веществом, два пусковых устройства (рис. 1).



Рис. 1. Аппарат спасательный передвижной АСП с аудиовизуальной сигнализацией для включения в автоматизированную систему

Технические характеристики АСП представлены в таблице.

Таблица

Технические характеристики АСП

Параметр	Значение
Время защитного действия при включении шести человек, мин, не менее	90
Количество воздухопроводов, шт.	6
Количество самоспасателей ШСС-1У или ШСС-1П, шт., не менее	15
Вместимость дыхательного мешка, дм ³ , не менее	15
Габариты, мм, не более	1200 × 750 × 400
Масса пункта (без самоспасателей), кг, не более	85
Срок службы (с заменой отдельных узлов), год, не менее	10

В случае, когда все каналы заняты, а время защитного действия самоспасателя заканчивается, предусмотрена возможность непосредственного переключения из своего самоспасателя в резервный в пункте переключения, что полностью исключает ожидание переключения в непригодной для дыхания среде. Такую ситуацию описывает модель Erlang B (система с отказами). Вероятность отказа (вероятность поступления запроса на включение в пункт переключения в момент, когда все каналы заняты) P_B определяют по уравнению

$$P_B = \frac{\frac{A^N}{N!}}{\sum_{n=0}^N \frac{A^n}{n!}}.$$

Для повышения надежности АСП включали в автоматизированную общешахтную систему безопасности, для чего оснащали датчиком открытия дверей и аудиовизуальной сигнализацией. Это позволяло при открытии дверей пункта АСП подавать сигнал горному диспетчеру шахты о происшествии [4].

Таким образом, разработанные НИИ «Респиратор» аппараты АСП обеспечивают жизнедеятельность шахтеров за счет генерации кислорода химическим продуктом, в отличие от работы [3], где предусмотрено использование сжатого воздуха. Если в АСП безопасность переключения обеспечивалась за счет непосредственного подключения пользователя к воздухопроводной системе аппарата через загубники, то в пунктах переключения согласно ГОСТ Р 70061-2022 свежий воздух должен распределяться по всему объему ППС.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Анализ результатов исследования свидетельствует о том, что поиск оптимального решения вопроса самоспасения шахтеров в аварийных горных выработках необходимо продолжить.

Список литературы / References

1. Фомин, А. И. Современное состояние аварийности, травматизма на предприятиях угольной отрасли России / А. И. Фомин // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах : сборник материалов XII Международной научно-практической конференции, Кемерово, 22–23 ноября 2017 г. – Кемерово : Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, 2017. – С. 217.

Fomin A. I. *Sovremennoye sostoyaniye avariynosti, travmatizma na predpriyatiyakh ugolnoy otrasli Rossii* [Present-day state of accident and injury rates at coal mining enterprises of Russia]. *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti predpriyatiy v promyshlennno razvitykh regionakh* : collection of papers of XII International scientific and practical conference, Kemerovo, November 22-23, 2017. Kemerovo, Kuzbasskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. T. F. Gorbachyova Press, 2017, p. 217. (In Russian)

2. Белый, Е. К. Введение в теорию массового обслуживания / Е. К. Белый. – Петрозаводск : Издательство ПетрГУ, 2014. – 76 с.

Belyy Ye. K. *Vvedeniye v teoriyu massovogo obsluzhivaniya* [Introduction into queuing theory]. Petrozavodsk, PetrGU Press, 2014, 76 p. (In Russian)

3. Конопелько, Е. И. Совершенствование пунктов переключения в резервные самоспасатели, применяемые в угольных шахтах / Е. И. Конопелько, Э. Г. Ильинский, Р. С. Плетенецкий // Промышленная безопасность и вентиляция

подземных сооружений в XXI столетии : материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 90-летию Донецкого национального технического университета. – Донецк : ДонНТУ, 2011. – С. 16 – 19.

Konopelko Ye. I., Ilinskiy E. G., Pletenetskiy R. S. *Sovershenstvovaniye punktov pereklyucheniya v rezervnyye samospasateli, primenyaemye v ugolnykh shakhtakh* [Improvement of mine change-over stations utilized at coal mines]. *Promyshlennaya bezopasnost i ventilyatsiya podzemnykh sooruzheniy v XXI stoletii* : papers of the International scientific-practical conference dedicated to 90th anniversary of the Donetsk National Technical University. Donetsk, DonNTU Press, 2011, pp. 16-19. (In Russian)

4. Пункты переключения в резервные самоспасатели с системой аудиовидеосигнализации и связи / Э. Г. Ильинский, Е. И. Конопелько, Р. С. Плетенецкий, Ю. А. Шип // Горноспасательное дело : сборник научных трудов / НИИГД «Респиратор». – 2012. – № 1(49). – С. 173 – 179.

Ilinskiy E. G., Konopelko Ye. I., Pletenetskiy R. S., Ship Yu. A. *Punkty pereklyucheniya v rezervnyye samospasateli s sistemoy audiovideosignalizatsii i svyazi* [Mine change-over stations equipped with audio and video alarm and communication systems]. *Gornospasatelnoye delo : collection of scientific papers of the NIIGD "Respirator"*, 2012, no. 1(49), pp. 173-179. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 20.02.2022
Дата опубликования 17.03.2022

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

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

Ruslan Sergeyevich Pletenetskiy, senior scientific associate; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;

Lyubov Alekseyevna Zborshchik, senior scientific associate; e-mail: lzborschik@yandex.ru;

Viktor Ivanovich Frantsev, principal engineer; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru

State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"

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

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-45

MODERN REQUIREMENTS FOR MINE CHANGE-OVER STATIONS

Purpose. Investigation of a possibility to improve multistage evacuation system utilizing the mine reserve self-rescuers change-over stations in order to increase the safety of underground works at the mining enterprises.

Methods. Analytical methods of investigations of the current collective protection equipment utilized in the multistage evacuation system for the underground personnel of the mining enterprises.

Results. The advantages and disadvantages of the existing collective protection equipment utilized at the stages of multistage evacuation of the miners from the accident area have been established.

Scientific novelty. The functioning of the modern self-rescue systems and collective protection equipment of the underground personnel has been considered from the perspective of the queuing theory.

Practical value. The conducted investigations have permitted to define the directions for improvement of the collective protection equipment and the miners' self-rescue systems.

Keywords: *breathing apparatus; mine self-rescuer; respiratory collective protection equipment; multistage evacuation system; mine reserve self-rescuers change-over station; evacuation route.*

УДК 614.8-051:159.944.3**Владимир Владимирович Черкесов**, д-р мед. наук, ст. науч. сотр.;e-mail: cherkesov.vv@gmail.com

Государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Академия гражданской защиты МЧС ДНР»

283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а. Тел.: (+7 856) 304-43-76

ПРОФЕССИОНАЛЬНЫЙ РИСК СПАСАТЕЛЯ МЧС. РОЛЬ МЕДИКО-ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ГОТОВНОСТИ И АДАПТАЦИИ К РИСКУ

Цель. Анализ и оценка проблемы личностной готовности к риску спасателя МЧС, которая в данной работе рассматривается как базовый функциональный паттерн в системе единого интеллектуально-личностного потенциала человека, для повышения стрессоустойчивости в экстремальных чрезвычайных ситуациях.

Методы. Экспериментальные и информационно-аналитические исследования.

Результаты. Обоснованы методические подходы и критерии оценки психосоматического состояния спасателей, позволяющие поддерживать оптимальный уровень адаптации организма при ведении аварийно-спасательных и других неотложных работ в условиях чрезвычайных ситуаций.

Научная новизна. Впервые обоснованы и предложены методы оценки психосоматического состояния спасателей, позволяющие повысить эффективность профессиональных действий в условиях слабо прогнозируемой и часто неуправляемой ситуации, а также снизить риск развития у них как синдрома профессионального выгорания, так и психосоматических расстройств.

Практическая значимость. Исследованные системные (психосоматические) подходы к оценке готовности спасателя МЧС к профессиональному риску позволят в условиях тактической неопределенности выбрать оптимальные решения, основанные на балансе психических и физиологических функций организма.

Ключевые слова: спасатели МЧС; чрезвычайные ситуации; профессиональные риски; психологические факторы риска; адаптация.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. В классической медицине и психологии считается, что индивидуальность и ситуативность предпочтений (выбора) человека в обычной и экстремальной ситуации объясняется индивидуальным уровнем когнитивного развития, что позволяет анализировать значительные объемы информации об окружающей среде и принимать оптимальное и зачастую единственно правильное решение, а также базируется на общей адаптации и возможностях организма [1].

Крайне важно достигнуть такого баланса на основе сравнения результатов эффективного анализа с возникшими целями и задачами личности.

Индивидуальные различия в решении ситуативных задач выбора у спасателей базируются на четырех факторах:

1. Объем внешней информации о чрезвычайной ситуации.
2. Индивидуальные психические характеристики спасателя.

3. Ситуативные цели и задачи.

4. Состояние физиологической и психической адаптации, сформировавшейся в данное время.

Остается открытым вопрос о возможности адаптировать человека и повысить его скорость принятия решений в динамично изменяющейся обстановке. Это не только важная, но и критически необходимая составляющая профессионализма спасателя МЧС [6].

Цель исследования – анализ и оценка проблемы личностной готовности к риску спасателя МЧС, которая в данной работе рассматривается как базовый функциональный паттерн в системе единого интеллектуально-личностного потенциала человека, для повышения стрессоустойчивости в экстремальных чрезвычайных ситуациях.

Изложение основного материала. Для решения поставленных задач был обследован 101 человек – мужчины в возрасте от 18 до 41 года. Экспериментальную группу составили спасатели МЧС ДНР: 80 мужчин в возрасте от 18 до 41 года и контрольная группа – 31 учащийся АГЗ МЧС ДНР, средний возраст которых составлял $(18,3 \pm 0,08)$ лет.

Для обследования спасателей из экспериментальной и контрольной групп в данной работе использованы следующие методы: метод наблюдения, клиническое интервью, 16-факторный личностный опросник Р. Кеттелла, личностный опросник Г. Айзенка, методика для изучения самооценки, опросник «Шкала реактивной (ситуативной) и личностной тревожности» Ч. Д. Спилбергера – Ю. Л. Ханина, экспериментально-психологическая методика изучения фрустрационных реакций С. Розенцвейга, тест «Моторная проба Шварцландера», методика «Локус контроля» (когнитивная ориентация в модификации О. П. Елисеева) [2].

В ходе психологического тестирования установлено, что испытуемые из экспериментальной группы имеют достаточно высокую самооценку, свидетельствующую о самоуважении, уверенности в себе при несколько сниженной критичности в отношении себя.

Наиболее высокая самооценка ($0,99 \pm 0,02$) характерна для спасателей, имеющих средний стаж работы ($5,3 \pm 0,77$) лет. В свою очередь, коэффициент ранговой корреляции дает положительные корреляционные связи с факторами «алаксия – протензия» и «консерватизм – радикализм» и отрицательные связи с показателем целевого отклонения, касающимся личностной и ситуативной тревожности ($p < 0,05$). Это указывает на то, что незначительное расхождение или его отсутствие между реальным и идеальным образами «Я» отражает удовлетворенность собой, слабо выраженное стремление к самосовершенствованию, что свидетельствует о низком уровне притязаний.

Высокая самооценка предполагает уверенность в себе, а у уверенного в себе спасателя не проявляются симптомы, свидетельствующие о высоком уровне

тревожности. В связи с тем что эта профессия требует не только гибкости и адекватных решений, но и осмотрительности, естественно, что спасатели отличаются осторожностью и стремлением «проверить все самому» [9, 10].

С одной стороны, профессия спасателя привлекает уверенных в себе людей, жаждущих риска и приключений, а с другой – предпочтение профессии спасателя повышает самооценку, так как для работы в экстремальных условиях требуются специалисты, уверенные в себе и в своих силах.

Комплексный анализ результатов психосоматического тестирования позволяет прийти к выводу, что большинство спасателей характеризуются высокой самооценкой, уверенностью в себе и в своих силах, что является основой формирования высокого уровня адаптации (психической и физиологической), а также поддержания стрессоустойчивости в экстремальных ситуациях.

Критерии личностной и ситуативной тревожности у спасателей положительно коррелируют между собой, что указывает на зависимость ситуативной тревожности от личностной ($p < 0,01$). Критерий личностной тревожности положительно коррелирует с показателями экстернатности ($p < 0,05$), нейротизма, сниженной психической адаптации, факторами «гипотимия – гипертимия», «фрустрированность – нефрустрированность» и «низкая – высокая» тревожность, а также имеет отрицательную связь с показателями самооценки ($p < 0,05$), показателями «сила – слабость» «Я», «доминантность – конформность», «сургенсия – десургенсия» ($p < 0,05$), «пармия – трекгия» (трекгия – робость, застенчивость), «консерватизм – радикализм» ($p < 0,05$), показателями контроля желаний и импульсивностью, экстраверсией и интроверсией.

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что подавляющее число спасателей МЧС отличаются интернальным типом локуса контроля, что опосредованно говорит о стрессоустойчивости в экстремальных ситуациях и при проведении аварийно-спасательных и других неотложных работ.

В экспериментальной группе спасателей уровень психической адаптации находится в пределах от 1 до 2 баллов, что граничит с эффективной психической адаптацией и соответствует стабильности психосоматического состояния, отвечающего за интегральную адаптацию, а не только за ее психический компонент, но при ликвидации чрезвычайных ситуаций может привести к психической дезадаптации, а в последующем к развитию психосоматических состояний и коморбидных заболеваний.

Следует отметить, что большинство спасателей характеризуются низким уровнем личностной и ситуативной тревожности, эмоциональной устойчивостью и уравновешенностью. Однако «накопительное» негативное влияние неблагоприятных профессионально-производственных факторов условий труда спасателя не только влияет на когнитивные личностные характеристики, но и приводит к значительному снижению психосоматической адаптации организма.

Если в основе нарушения адаптации спасателя триггерным фактором становится острый либо хронический тревожный синдром во всех его проявлениях, а на его фоне растут беспокойство, неуверенность, снижается контроль за эффективностью своей профессиональной деятельности, лавинообразно также снижаются и показатели общей адаптации организма, что на ранних этапах проявляется в принятии ошибочных решений в ситуациях выбора в условиях дефицита времени, а на поздних – в создании жизнеопасных ситуаций.

В контрольной группе уровень психосоматической адаптации соответствует ее эффективным параметрам и свидетельствует о способности испытуемых данной группы к адаптации в привычной обстановке и в экстремальных условиях чрезвычайных ситуаций.

Таким образом, можно сделать вывод, что у большинства спасателей МЧС достаточно эффективна психосоматическая адаптация, что является основой формирования профессиональной стрессоустойчивости в экстремальных условиях.

По уровню распространенности у спасателей ведущее место занимают болезни органов сердечно-сосудистой системы (40 %) [5], а у каждого пятого выявлены заболевания опорно-двигательного аппарата. Из других патологий следует отметить высокую распространенность среди них болезней органов дыхания и эндокринной системы [4].

Психосоматической патологией страдают представители практически всех профессиональных групп. Если до недавнего времени считалось, что сотрудники силовых структур в меньшей мере подвержены риску ее развития, то в настоящее время анализ структуры заболеваемости лиц данного контингента свидетельствует о неуклонном росте частоты сердечно-сосудистой патологии среди сотрудников силовых структур. Учитывая, что спасатели МЧС во время выполнения профессиональных задач часто испытывают стресс, связанный с угрозой жизни, можно предположить, что механизмы развития психосоматической патологии в этой профессиональной группе значительно отличаются от лиц менее экстремальных профессий [3, 6].

Выявление механизмов развития психосоматической патологии у спасателей МЧС на ранних этапах, когда еще отсутствуют клинические проявления заболевания, а установлено только снижение показателей общей адаптации, обоснованно и перспективно не только с позиций ранней профилактики и реабилитации, но и для поддержания на должном уровне профессиональной адаптации и сохранения высоко квалифицированных ресурсов МЧС [8].

Выводы.

1. Для спасателей МЧС характерны высокий уровень организации интеллектуальной деятельности, эмоциональная стабильность, экстраверсия, высокая самооценка с умеренно выраженным уровнем притязаний, низким уровнем личностной и ситуативной тревожности, высоким самоконтролем,

фрустрационной толерантностью, достаточной и сбалансированной психосоматической адаптацией. Спасатели обладают способностями к самостоятельной (индивидуальной) и к совместной (групповой) профессиональной деятельности [7].

2. Менее чем у 20 % спасателей МЧС установлены эмоциональная нестабильность, интроверсия, более низкая самооценка, средний уровень личностной и ситуативной тревожности на фоне низкого самоконтроля, с более низкой фрустрационной толерантностью, неустойчивой психосоматической адаптацией. Интегральная характеристика психосоматических факторов ослабляет стрессоустойчивость в экстремальных чрезвычайных ситуациях и является результатом недостаточно квалифицированного медико-психологического профотбора или невысокой профессиональной подготовки спасателей.

3. В отличие от спасателей с нормотонией (нормальными цифрами АД) испытуемые со склонностью к гипертензивным реакциям обладают более высоким уровнем притязаний и выраженной ответственностью, сенситивностью и ситуативной тревожностью, а также низкой стрессоустойчивостью в экстремальных ситуациях, скорее всего, за счет высокой «платы» адаптационных механизмов.

Список литературы / References

1. Алишев, Б. С. Предпочтение как функция психики / Б. С. Алишев // Ученые записки Казанского университета. Серия: Гуманитарные науки. – 2011. – Т. 153, кн. 5. – С. 7 – 16.

Alishev B. S. *Predpochteniyе kak funktsiya psikhiki* [Bias as a function of mind]. *Uchenyye zapiski Kazanskogo universiteta. Seriya: Gumanitarnyye nauki*, 2011, vol. 153, book 5, pp. 7-16. (In Russian)

2. Дежкина, Ю. А. Развитие профессионально важных качеств сотрудников государственной службы МЧС России в процессе профессионализации : автореферат диссертации ... кандидата психологических наук / Ю. А. Дежкина. Санкт-Петербург : РГПУ, 2008. – 20 с.

Dezhkina Yu. A. *Razvitiye professionalno vazhnykh kachestv sotrudnikov gosudarstvennoy sluzhby MChS Rossii v protsesse professionalizatsii : avtoreferat dissertatsii ... kandidata psikhologicheskikh nauk* [Development of professionally important qualities of EMERCOM of Russia state service personnel in the process of job-oriented training : author's abstract of Cand. psych. Sci. diss.]. St. Petersburg, RGPU Press, 2008, 20 p. (In Russian)

3. Диагностика, профилактика и коррекция стрессовых расстройств среди сотрудников Государственной противопожарной службы МВД России : методическое пособие. – 2-е изд. – М., 2001. – 256 с.

Diagnostika, profilaktika i korrektsiya stressovykh rasstroystv sredi sotrudnikov Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MVD Rossii : metodicheskoye posobiye. 2-ye izd. [Diagnostics, prophylactic treatment and correction of stress disorders among the personnel of the State fire-fighting service of the Ministry of Internal Affairs of the Russian Federation : guidelines]. Moscow, 2001, 256 p. (In Russian)

4. Анализ структуры и динамики показателей смертности от болезней системы кровообращения в России в 2006 и 2014 гг. / С. А. Бойцов, И. В. Самородская, М. А. Старинская [и др.] // Профилактическая медицина. – 2016. – № 19(2-2). – С. 11 – 12.

Boytsov S. A., Samorodskaya I. V., Starinskaya M. A. [et al.]. *Analiz struktury i dinamiki pokazateley smernosti ot bolezney sistemy krovoobrashcheniya v Rossii v 2006 i 2014 gg.* [Analysis of structure and dynamics of indices of fatality circulatory diseases]. *Profilakticheskaya meditsina*, 2016, no. 19 (2-2), pp. 11-12. (In Russian)

5. Затраты на лечение артериальной гипертензии взрослым населением города Донецка / О. С. Налётова, М. М. Алесинский, С. В. Налётов, Э. Л. Белевцова // Архив клинической и экспериментальной медицины. – 2022. – Т. 31, № 1. – С. 46 – 49.

Nalyotova O. S., Alesinskiy M. M., Nalyotov S. V., Belevtsova E. L. *Zatraty na lecheniye arterialnoy gipertenzii vzroslym naseleniyem goroda Donetska* [Expenses of adult population of Donetsk city on arterial hypertension treatment]. *Arkhiv klinicheskoy i eksperimentalnoy meditsiny*, 2022, vol. 31, no. 1, pp. 46-49. (In Russian)

6. Петров, А. В. Существующие и перспективные подходы к управлению аварийно-спасательными подразделениями при угрозе возникновения чрезвычайной ситуации / А. В. Петров, Ю. С. Горбунова, В. Г. Кудряшов // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования : научный журнал. – Вып. 3(10). – Донецк, 2021. – С. 328 – 332.

Petrov A. V., Gorbunova Yu. S., Kudryashov V. G. *Sushchestvuyushchiye i perspektivnyye podkhody k upravleniyu avariynno-spasatelnyimi podrazdeleniyami pri ugroze vozniknoveniya chrezvychaynoy situatsii* [Existing and promising approaches to emergency rescue unit management in case of emergency occurrence threat]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost : problemy i puti sovershenstvovaniya : nauchnyy zhurnal*, issue 3(10), Donetsk, 2021, pp. 328-332. (In Russian)

7. Психология экстремальных ситуаций для спасателей и пожарных / под общей редакцией кандидата психологических наук Ю. С. Шойгу. – М. : Смысл, 2007. – 319 с.

Cand. Sci. (Psy.) Shoigu Yu. S. [ed.]. *Psikhologiya ekstremalnykh situatsiy dlya spasateley i pozharnykh* [Psychology of extreme situations for rescuers and firefighters]. Moscow, Smysl Publ., 2007, 319 p. (In Russian)

8. Учебник спасателя / С. К. Шойгу, М. И. Фалеев, Г. Н. Кириллов [и др.] ; под общей редакцией Ю. Л. Воробьева. – 2-е изд., перераб. и доп. – Краснодар : Сов. Кубань, 2002. – 528 с.

Shoigu S. K., Faleyev M. I., Kirillov G. N. [et al.]. Vorobyev Yu. L. [gen. ed.]. *Uchebnik spasatelya. 2-ye izd., pererab. i dop.* [Rescuer's textbook. The 2nd edition, revised and supplemented]. Krasnodar, Sovetskaya Kuban Publ., 2002, 528 p. (In Russian)

9. Porsolt R. D., Bertin A., Jalfre M. "Behavioural despair" in rats and mice: strain differences and the effects of imipramine. *European Journal of Pharmacology*, 1978, no. 51(3), pp. 291-294. (In English)

10. Sachdev P. S., McBride R., Loo C., Mitchell P. M., Mahli J. S., Croker D. [et al.]. Effects of different frequencies of transcranial magnetic stimulation (TMS) on the forced swim test model of depression in rats. *Biological Psychiatry*, 2002, no. 51(3), pp. 474-475. (In English)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 20.02.2022
Дата опубликования 17.03.2022

Vladimir Vladimirovich Cherkesov, Dr. Sci. (Med.), senior scientific associate;

e-mail: cherkesov.vv@gmail.com

The Civil Defence Academy of EMERCOM of the DPR

283050, Donetsk, 34a, ulitsa Rozy Luxemburg. Phone: (+7 856) 304-43-76

OCCUPATIONAL RISK OF EMERCOM RESCUER. INFLUENCE OF MEDICAL AND PSYCHOLOGICAL FACTORS OF READINESS AND ADAPTATION TO RISK

Purpose. Analysis and estimation of a problem of EMERCOM rescuer's personal readiness to the risk which is considered in this research as a basic functional pattern within the system of unified intellectual and personal human potential in order to improve the stress tolerance in extreme emergency situations.

Methods. Experimental and informational and analytical investigations.

Results. There have been the methodological approaches and estimation criteria of the rescuers' psychosomatic state substantiated making it possible to sustain an optimal level of organism adaptation during carrying out the emergency rescue and other urgent operations in conditions of emergency situations.

Scientific novelty. For the first time ever the methods for assessment of rescuers' psychosomatic state have been substantiated and proposed making it possible to improve the effectiveness of professional actions in conditions of hard-to-predict and often uncontrollable situation as well as to reduce the risk of development a syndrome of professional burnout and psychosomatic disorders of the rescuers.

Practical value. The investigated system (psychosomatic) approaches to the evaluation of EMERCOM rescuer's readiness to the risk will permit to choose the optimal solutions based on the balance of psychic and physiological functions of the body.

Keywords: *EMERCOM rescuers; emergency situations; occupational risks; psychological risk factors; adaptation.*

УДК 614.842.862

Елена Ивановна Добрякова, науч. сотр.; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Александр Анатольевич Булатников, инж. I кат.; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-44

ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ

Цель. Обоснование необходимого количества пожарно-спасательных подразделений МЧС, определение расчетных зон обслуживания и мест дислокации для обеспечения ликвидации пожаров с наименьшими потерями.

Методы. Аналитические исследования моделей расчетов необходимого количества пожарно-спасательных подразделений, применяемых в России, США, Франции и ДНР.

Результаты. Рассмотрены существующие модели расчета необходимого количества пожарно-спасательных подразделений. Проанализированы нормативные показатели, используемые для определения необходимого количества пожарно-спасательных подразделений. Разработана модель процесса определения необходимого количества пожарно-спасательных подразделений. Рассмотрена перспектива использования беспилотных летательных аппаратов в организации тушения пожаров.

Научная новизна. Определены основные положения и требования к обоснованию необходимого количества пожарно-спасательных подразделений. Исследована возможность применения беспилотных летательных аппаратов для снижения времени прибытия к объектам защиты на территории сельской местности.

Практическая значимость. Применение разработанной концептуальной модели расчетов необходимого количества пожарно-спасательных подразделений позволяет получить графическое изображение расчетных зон обслуживания.

Ключевые слова: *пожар; время прибытия; пожарно-спасательное подразделение; скорость движения; пожарный автомобиль; критерии образования.*

Постановка проблемы. Минимизация времени прибытия пожарно-спасательного подразделения (далее – ПСЧ) на место вызова – это неотъемлемая часть комплекса мероприятий, обеспечивающих ликвидацию пожара с наименьшими потерями. Один из путей сокращения времени прибытия ПСЧ – увеличение количества пожарных депо. Поиск баланса между количеством пожарных депо и материальными затратами на их строительство – актуальная проблема для специалистов, решающих задачи по обеспечению противопожарной защиты. В связи с этим исследованы мировая тенденция использования беспилотных летательных аппаратов (далее – БПЛА) для ликвидации пожаров и возможность влияния на расчетное количество ПСЧ.

Анализ последних исследований. В рамках исследования взаимосвязи количества пожарных депо и среднего времени следования пожарных автомобилей Н.Н. Брушлинский [1] приводит диапазоны средней площади обслуживания одним депо от 149,9 км² (София) до 3,8 км² (США), при этом согласно мировой практике средняя площадь обслуживания одним депо составляет 15...16 км². Автор [1] считает достаточной зону

обслуживания одного депо 12...15 км² для обеспечения времени прибытия пожарного автомобиля не более 10 мин.

При используемых в расчетах ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР» радиусах обслуживания 3 км (для городов) и 10 км (для сельской местности), нормируемых Критериями образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах (далее – Критерии) [2], площадь зоны ответственности составляет 28,26 и 314 км² соответственно, что значительно превышает показатели, приведенные выше. Предположим, что результаты расчетов необходимого количества пожарно-спасательных подразделений при использовании приведенных выше нормативных показателей существенно отличаются. В статье [3] авторы провели анализ нормируемых показателей для расчета количества ПСЧ и сделали вывод, что показатель по времени прибытия пожарного автомобиля является базовым для оценки уровня обеспечения пожарной защиты территории России, США и т.д. Величины нормируемых показателей времени прибытия пожарной техники сопоставимы с Критериями и не превышают 10 мин для городской территории и 20 мин для территории сельской местности. В США и Франции в основу расчетов кроме времени прибытия подразделения на место вызова положен радиус обслуживания пожарно-спасательного подразделения. В США радиус обслуживания колеблется в диапазоне 1,6...4,8 км (в зависимости от плотности застройки и этажности зданий).

Цель исследования – обоснование необходимого количества пожарно-спасательных подразделений МЧС, определение расчетных зон обслуживания и мест дислокации для обеспечения ликвидации пожаров с наименьшими потерями.

Результаты исследований. В основу расчетов положена концептуальная модель с применением критериев времени прибытия, радиуса обслуживания и средней скорости движения пожарного автомобиля, основанная на иерархической приоритетности критерия времени прибытия ПСЧ на место вызова. На основании результатов проведенного аналитического исследования Критериев установлена всеобщая и необходимая связь между ними. Модель расчетов с применением Критериев приведена на рис. 1.

Как следует из анализа модели, в качестве нормируемых показателей для определения мест дислокации и количества ПСЧ принимают радиус обслуживания R , скорость движения пожарного автомобиля V и время прибытия к месту вызова первого пожарно-спасательного подразделения t .

В рамках исследований в НИИ «Респиратор» выполнили графическую оценку времени прибытия пожарно-спасательных подразделений путем нанесения на карту их расчетной зоны ответственности. Нанесенные на карту окружности радиусом 3 км с центром в месте дислокации (далее – МД) пожарно-спасательного подразделения использовали для ориентировочного расчета необходимого количества пожарных депо (рис. 2).

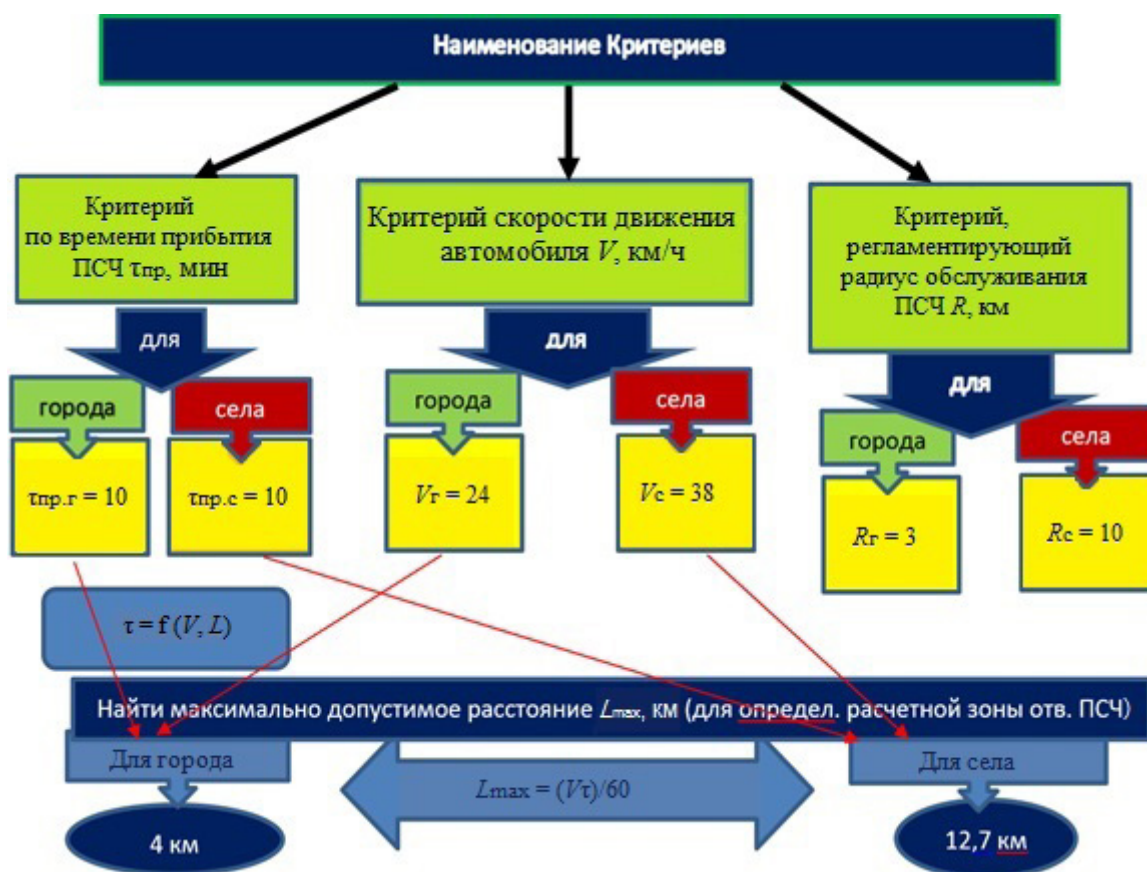


Рис. 1. Модель расчетов с применением Критериев

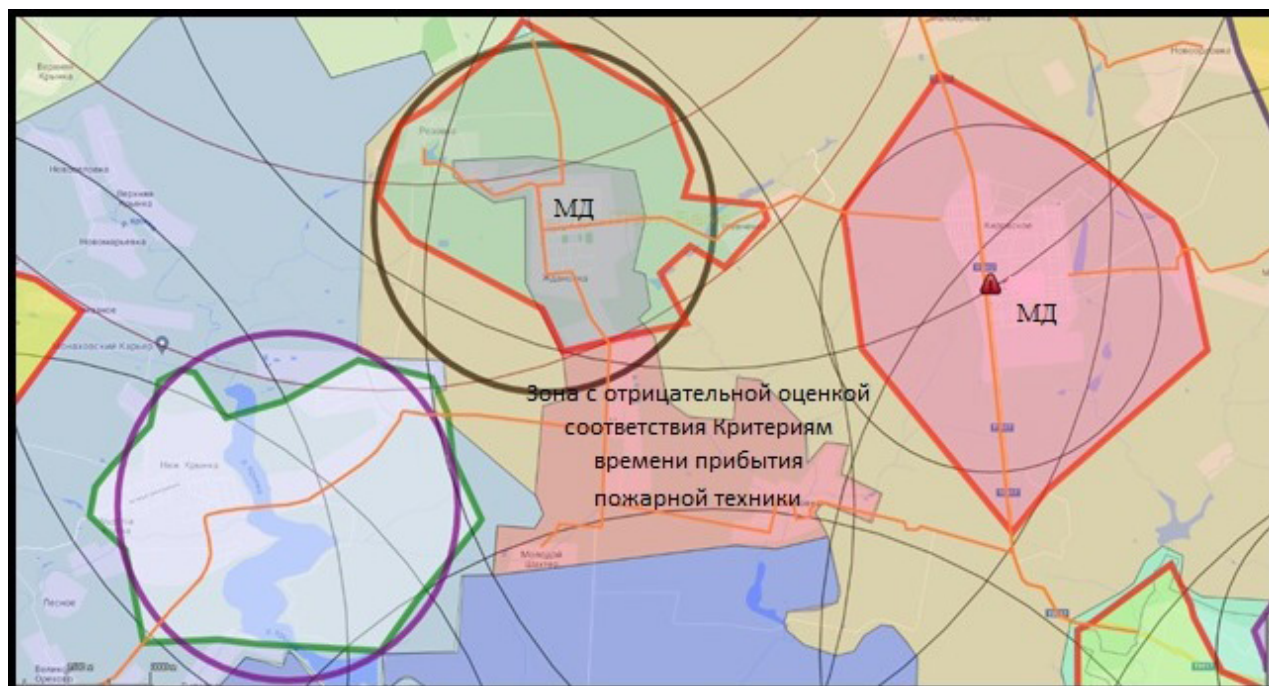


Рис. 2. Территории зон ответственности:
 расчетные зоны ответственности пожарно-спасательных подразделений –
 ломаные многоугольники; зоны ответственности – окружности радиусом 3 км
 с центром в месте дислокации подразделений

Нанесение расчетных зон ответственности ПСЧ позволило с высокой точностью выделить территории с отрицательной оценкой соответствия Критериям времени прибытия существующих ПСЧ. Границу территории корректировали расчетами.

Схема алгоритма определения количества ПСЧ, примененная НИИ «Респиратор» при расчете необходимого для обеспечения Критериев количества пожарно-спасательных подразделений, приведена на рис. 3.

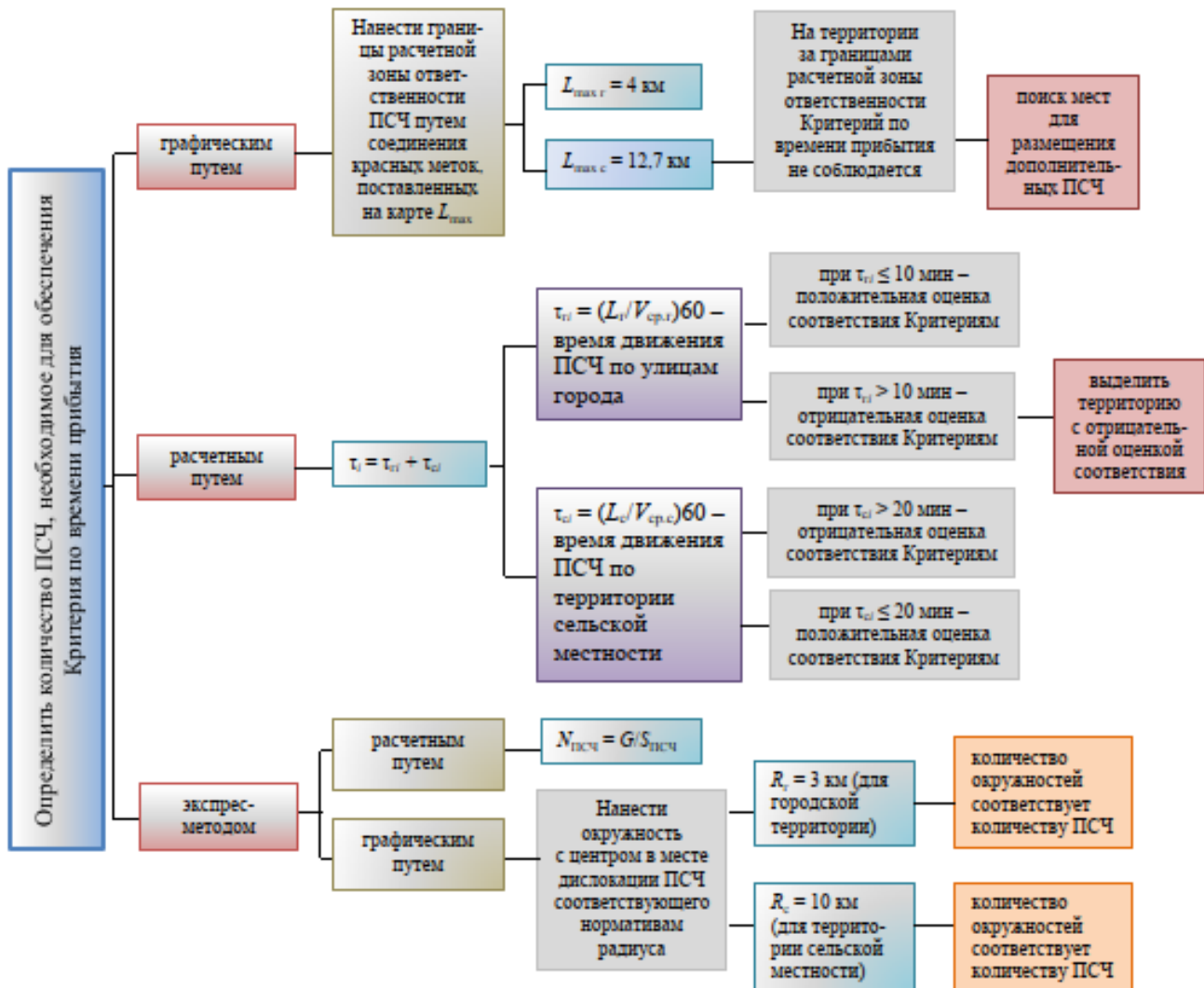


Рис. 3. Блок-схема алгоритма процесса определения количества пожарно-спасательных подразделений:

$N_{\text{псч}}$ – расчетное количество ПСЧ; G – площадь защищаемой территории;

$S_{\text{псч}}$ – расчетная зона ответственности ПСЧ

Расчеты базируются на проведении аналитических исследований соответствия нормативным требованиям времени прибытия существующих ПСЧ на место вызова. Результаты исследований основаны на визуализации графической оценки (выполненной с помощью картографической

и навигационной программы «SAS.Планета») и автоматизированных вычислениях времени прибытия ПСЧ на улицы городов и в населенные пункты сельской местности (выполненных с помощью программы EXCEL).

Сравним результаты расчетов количества ПСЧ, выполненных НИИ «Респиратор», с расчетами по формуле (1), предлагаемой авторами статьи [1]:

$$N_d = 0,36 k_n^2 S / (\overline{V_{сл}^2} \overline{\tau_{сл}^2}), \quad (1)$$

где N_d – необходимое количество ПСЧ, депо;

k – безразмерный коэффициент нелинейности уличной сети;

S – площадь территории города, км²;

$\overline{V_{сл}^2}$ – средняя скорость движения пожарных автомобилей, км/мин;

$\overline{\tau_{сл}^2}$ – среднее время следования пожарных автомобилей к месту пожара, мин.

В рассматриваемом примере, взятом из наших расчетов, площадь территории города составляет 426 км², коэффициент нелинейности дорог – 1,56, нормируемая Критериями скорость движения пожарного автомобиля по городу – 0,4 км/мин, нормируемое время прибытия – 10 мин. Тогда при расчетах по формуле (1) будет получено следующее количество депо:

$$N_d = 0,36 \cdot 2,43 \cdot 426 / (0,4^2 \cdot 10^2) = 23,29.$$

Согласно выполненным расчетам для обеспечения нормативного прибытия на объекты защиты, расположенные на территории рассматриваемого города, необходимо разместить 23 депо. В расчетах по методике НИИ «Респиратор» (при одинаковых исходных данных) расчетное количество составило 14 ПСЧ. Следовательно, по логике расчетов, приведенных в статье [1], благодаря примененной НИИ «Респиратор» методике удастся получить экономический эффект, сопоставимый с затратами на строительство 9 депо, только на территории рассматриваемого города.

Следует отметить, что в основу расчета количества ПСЧ, необходимого для обеспечения Критериев, НИИ «Респиратор» положена оценка времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к жилому сектору. Приоритетность выбранного направления исследований основана на результатах анализа пожаров, согласно которым каждый третий пожар происходит в жилом секторе. Но разработанная модель расчета обеспечивает возможность проведения оценки соответствия Критериям времени прибытия пожарно-спасательных подразделений и на производственные объекты.

Очевидно, что интенсивность возникновения пожаров в городской и сельской местности различна. В связи с этим целесообразность строительства новых депо не всегда очевидна. Возникает запрос на альтернативные способы тушения пожаров на удаленных от пожарных депо территориях.

В мировой практике с целью повышения мобильности процесса тушения пожаров в черте городов и лесных массивов используют БПЛА. Широкое распространение получили БПЛА для мониторинга за развитием пожара и поиска людей. А.Ю. Картеничев [4] отмечает возрастающую роль БПЛА в ликвидации последствий аварий. Научное сообщество активно разрабатывает БПЛА для тушения пожаров [5]. Для встречного пала при ликвидации лесных пожаров в США разработан пожарный дрон – поджигатель. В Латвии ведется разработка дрона, способного поднимать пожарный рукав на высоту до 300 м. Особый интерес разработчики и потенциальные пользователи проявляют к БПЛА, способным участвовать в процессе тушения пожара (таблица).

Таблица

Данные БПЛА, используемых в процессе тушения пожара

№ п/п	Модель	V	L , км	Время полета	Примечание
1	Гексакоптер YUNEEC H520 (Китай)	20 м/с	1,6	30 мин	Мониторинг, поиск людей
2	Дрон DOFEC (Чехия)	–	–	10 мин	Использует инфракрасные сенсоры для определения очагов возгорания и может отстреливать в них 600-граммовые противопожарные капсулы Bonpet. Одной капсулы достаточно для тушения пламени в пределах 8 м ³
3	БПЛА вертолетного типа JC260 (Китай), производитель QilingUAV	100 км/ч	–	3...4 ч	Оснащен парой «пожарных бомб» и способен сбрасывать их поочередно или одновременно. Каждый «боеприпас» покрывает участок горящего леса общим объемом до 50 м ³
4	Пожарный дрон EH216F (Китай), производитель EHang	130 км/м	5	21 мин	Может нести на борту 150 л противопожарной пены и 6 огнетушащих «бомб» за один рейс. На борту установлен длинный лафетный ствол, а над кабиной есть шестизарядный метатель. Противопожарные бомбы, выпущенные из этого приспособления, пробивают стекла здания за счет специального наконечника из твердого сплава. У дрона есть лазерный целеуказатель для точного наведения и камера. Дрон рассчитан на полуавтономную работу, процессом борьбы с огнем управляет оператор, а держится на позиции дрон самостоятельно

Окончание табл.

№ п/п	Модель	V	L , км	Время полета	Примечание
5	БПЛА CH-3A (Китай), компания China Aerospace Science and Technology Corporation	180 км/ч	2000	12 ч	В комплект входят БПЛА и вспомогательное транспортное средство объемом 2 тыс. л жидкостных огнетушащих веществ
6	Беспилотный вертолет K-MAX, компания Lockheed Martin и Kaman (США)	185 км/ч	500	3 ч	Способен сбросить более 2700 кг воды в очаг возгорания
7	Противопожарный вертолет Rumas 10F (Россия)	170 км/ч	600	10 ч	На вертолете установлена струйная система пожаротушения барабанного типа. Есть пневматическая баллистическая система (пушка) для высокоточного метания порошковых зарядов (снарядов) пожаротушения на расстояние в 25...30 м, что позволяет вести «стрельбу» по очагам огня в горящих помещениях [7]. Конструкция вертолета RUMAS-10F предусматривает его использование в качестве БПЛА

Выводы и перспективы дальнейшего исследования. В рамках проведенных исследований можно сделать вывод, что модель расчета количества пожарно-спасательных подразделений, необходимого для соблюдения Критериев по времени прибытия пожарной техники к объектам защиты, использованная ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР», позволила:

- выделить территории Донецкой Народной Республики, на которых невозможно обеспечить нормируемое время прибытия пожарной техники силами существующих ПСЧ путем нанесения на карту расчетных зон их ответственности и выполнения проверочных расчетов соблюдения нормативных показателей времени прибытия пожарной техники;
- выполнить расчет мест, предпочтительных для размещения дополнительных ПСЧ, и рассчитать их количество;
- провести расчеты, обеспечивающие получение результатов различной степени точности в зависимости от поставленных задач и выделенного времени для их решения;
- установить, что применение БПЛА может существенно сократить время доставки тушащих веществ к месту возникновения пожара на труднодоступных объектах защиты.

В качестве перспективы развития данного исследования целесообразно:

- создать базу экспертных оценок пожарной безопасности производственных

объектов для проведения оценки соответствия Критериям времени прибытия ПСЧ на объекты защиты с учетом характеристик пожарной опасности объектов;

- исследовать возможность использования БПЛА для тушения пожаров на объектах защиты в сельской местности.

Список литературы / References

1. Брушлинский, Н. Н. О нормировании времени прибытия пожарных подразделений к месту пожара / Н. Н. Брушлинский, С. В. Соколов // Пожаровзрывобезопасность. – М. : ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет. – 2011. – Т. 20, № 9. – С. 42 – 48.

Brushlinskiy N. N., Sokolov S. V. *O normirovanii vremeni pribytiya pozharnykh podrazdeleniy k mestu pozhara* [On time-limits of fire subdivisions arrival to a fire location]. *Pozharovzryvobezopasnost*. Moscow, FGBOU VO Natsionalnyy issledovatel'skiy Moskovskiy gosudarstvennyy stroitel'nyy universitet Press, 2011, vol. 20, no. 9, pp. 42-48. (In Russian)

2. Критерии образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах: утв. Постановлением Правительства Донецкой Народной Республики от 22.11.2019 № 37-11.

Kriterii obrazovaniya gosudarstvennykh pozharno-spasatelnykh podrazdeleniy v administrativno-territorialnykh yedinit'sakh: utverzhdeny Postanovleniem Pravitel'stva Donetskoy Narodnoy Respubliki ot 22.11.2019 № 37-11 [Criteria for formation of the state fire-and-rescue subdivisions in administrative and territorial units: as amended by the Decree of the Donetsk People's Republic Government of November 22, 2019, no. 37-11]. (In Russian)

3. Костямин, Д. И. Базовые показатели для определения мест дислокации ПСЧ / Д. И. Костямин, Е. И. Добрякова // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – Донецк, 2019. – № 1(56). – С. 17 – 24.

Kostyamin D. I., Dobryakova Ye. I. *Bazovye pokazateli dlya opredeleniya mest dislokatsii PSCh* [Basic parameters for determination of fire-and-rescue units location]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator" : nauchno-tekhnicheskij zhurnal*. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 17-24. (In Russian)

4. Картеничев, А. Ю. Технологии тушения пожаров с использованием беспилотных летательных аппаратов / А. Ю. Картеничев, Е. В. Панфилова // Киберленинка: офиц. сайт. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-tusheniya-pozharov-s-ispolzovaniem-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (дата обращения: 12.08.2022).

Kartenichev A. Yu., Panfilova Ye. V. *Tekhnologii tusheniya pozharov s ispolzovaniyem bespilotnykh letatelnykh apparatov* [Fire-fighting technologies with

application of unmanned flying vehicles]. *Cyberleninka : official website*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/tehnologii-tusheniya-pozharov-s-ispolzovaniem-bespilotnyh-letatelnyh-apparatov> (accessed 12.08.2022). (In Russian)

5. Анализ международного опыта применения беспилотных авиационных систем при ликвидации чрезвычайных ситуаций и пожаров : отчет о НИР. – М. : ВНИИПО, 2018. – 67 с.

Analiz mezhdunarodnogo opyta primeneniya bespilotnykh aviatsionnykh sistem pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy i pozharov : otchyot o NIR [Analysis of international experience in application of unmanned aircraft systems during elimination of emergencies and fires : scientific research report]. Moscow, VNIPO Publ., 2018, 67 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 12.10.2022
Дата опубликования 17.03.2023

Yelena Ivanovna Dobryakova, scientific associate; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;
Aleksandr Anatolyevich Bulatnikov, engineer of the 1st category; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru
State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"
of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-44

SUBSTANTIATION OF CALCULATION OF REQUIRED NUMBER OF FIRE-AND-RESCUE SUBDIVISIONS

Purpose. Substantiation of the required number of fire-and-rescue subdivisions of EMERCOM, determination of estimated areas of responsibility and deployment sites for ensuring the elimination of fires with minimal casualties.

Methods. Analytical investigations of models applied in Russia, the USA, France and the DPR for calculating the required number of fire-and-rescue subdivisions.

Results. The existing models for calculating the required number of fire-and-rescue subdivisions have been considered. The normative indicators used to determine the required number of fire-and-rescue subdivisions have been analyzed. A model of the process for determining the required number of fire-and-rescue subdivisions has been developed. The prospect of using unmanned aerial vehicles in the organization of fire extinguishing has been considered.

Scientific novelty. The main regulations and requirements for determining the required number of fire-and-rescue subdivisions have been defined. The possibility of using unmanned aerial vehicles to reduce the time of arrival to the objects of protection in rural areas has been investigated.

Practical value. The application of the developed conceptual model of calculations of the required number of fire-and-rescue subdivisions permits to obtain the graphic presentation of the estimated areas of responsibility.

Keywords: *fire; arrival time; fire-and-rescue subdivision; driving speed; fire-fighting appliance; criteria of formation.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК [622.867.2:519.81]:[614.842.621:614.843.3]

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

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

Андрей Викторович Ивахненко, инж.; e-mail: andrey_ivahnenko@mail.ru

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

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

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА НОМЕНКЛАТУРЫ СРЕДСТВ МЕХАНИЗАЦИИ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ НА ПРИМЕРЕ СРЕДСТВ ЗАБОРА ВОДЫ

Цель. Обосновать выбор номенклатуры средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода для повышения эффективности ведения горноспасательных работ.

Методы. Информационные и расчетно-аналитические исследования.

Результаты. Методом анализа иерархий выполнено ранжирование средств забора воды по приоритетности. Расчеты полностью подтверждаются результатами ранее проведенной научно-исследовательской работы.

Научная новизна. Впервые проведено ранжирование средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода методом анализа иерархий за счет структурирования проблемы по типу цель – критерии – альтернативы, выполнены численные расчеты по определению приоритетности.

Практическая значимость. Положительные результаты ранжирования средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода позволяют рекомендовать метод анализа иерархий для определения номенклатуры средств механизации горноспасательных работ, что повысит оперативность развертывания горноспасательных подразделений и эффективность ведения спасательных операций.

Ключевые слова: номенклатура; методика выбора; горноспасательные работы; средства забора воды; метод анализа иерархий; ранжирование.

Постановка проблемы. Под номенклатурой средств механизации горноспасательных работ понимается совокупность (список) названий технических средств, обладающих потребительскими свойствами и включенных в таблицу положенности. Средствами механизации оснащены все горноспасательные подразделения, поэтому эффективность спасательных и профилактических работ во многом определяют техническим уровнем и уровнем оснащенности средствами механизации горноспасательных работ. Информационный анализ показывает отсутствие исследований по обоснованию выбора технических средств механизации в горноспасательном деле. Прежде всего имеется в виду математическая формулировка задачи и установление области науки, соответствующей рассматриваемой проблеме, определение исходных данных для решения задачи, обоснование выбора методики оценки

технических средств, проведение расчетов по выбору номенклатуры на примере используемого горноспасательного оборудования. Задача в такой постановке в горноспасательном деле ставится и решается впервые.

Анализ последних исследований. В работах [1, 2] рассмотрена задача определения номенклатуры технического оснащения для спасательных отрядов МЧС Российской Федерации. Авторы предложили дополнить известные подходы новым, разработанным ранее для внутригруппового и межгруппового упорядочения (ранжирования) экономических объектов по приоритетности. Несмотря на математическую строгость изложения материала, научная новизна работы не очевидна, а предлагаемые решения известны. В статье [3] проведен обзор работ, направленных на решение задач теоретического и методологического обоснования номенклатуры технического оснащения спасательных формирований. Всего рассмотрено 13 научных работ и отчетов о НИР. В работе [4] разработана методика обоснования оснащения подразделений МЧС России для ликвидации чрезвычайных ситуаций на автомобильном транспорте, предложен комплексный критерий относительной общей пользы для выявления предположительного пожарно-технического оборудования, приведен алгоритм ранжирования технического объекта, изложена методика обоснованного выбора пожарно-технического оборудования. В работе [5] предложена методика комплексной оценки эффективности гидравлического аварийно-спасательного оборудования для ликвидации аварий на транспорте, в которой обоснована структура безразмерных комплексных показателей. Использование предложенных комплексных показателей основано на особенностях характеристик гидрооборудования и позволяет устранить экспертное оценивание. Разработанная методика не применима к другому типу аварийно-спасательного оборудования. В работе [6] систематически изложены математические методы теории принятия решения.

Цель исследования – обоснование выбора номенклатуры средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода для повышения эффективности ведения горноспасательных работ.

Результаты исследований. Каждому типу средств забора воды поставим в соответствие вектор (набор) технических характеристик, взятых, например, из эксплуатационной документации. В соответствии с определениями теории принятия решений типы средств забора воды назовем альтернативами, а технические характеристики – критериями. В табл. 1 приведены первичные информационные данные средств забора воды.

Анализ табл. 1 показывает, что критерии k_2 и k_3 могут быть взаимосвязанными, то есть дублированными и взаимообусловленными. Проверку на тесноту связи проведем путем вычисления коэффициента корреляции. Заметим, что традиционно применяемый коэффициент Пирсона не может быть использован, поскольку: объем выборки мал (три альтернативы), невозможно установить нормальность закона распределения

и линейный характер зависимости между критериями. Поэтому используем непараметрический ранговый коэффициент корреляции Спирмена или Кендела [7].

Таблица 1

Первичные информационные данные средств забора воды

Альтернатива		Критерий				
		k_1	k_2	k_3	k_4	k_5
		Диаметр отверстия, мм	Максимальный диаметр трубопровода, мм	Максимальная толщина стенки, мм	Максимальное давление, МПа	Масса, кг
ГП-3	K1	25	250	12	2,0	16,0
РГ-2-1	K2	28	300	15	6,4	20,3
ОСА	K3	30	250	12	2,0	9,0

Вычисления проведем, используя online-сервис. Результат расчета подтвердил предположение о сильной корреляции, коэффициент Спирмена равен 1, то есть связь носит не случайный, а функциональный характер. Исходя из этого, критерий k_3 исключаем из дальнейшего рассмотрения. Критерии k_2 и k_4 также сильно коррелированы, однако связь между ними не функциональная, а статистическая, поскольку значения k_4 зависят от параметров уплотнения. После процедуры сокращения критериев приведем все элементы табл. 1 к безразмерным величинам.

Поскольку в состав критериев входят разнотипные физические величины с различающимися единицами измерений, то преобразуем каждый элемент табл. 1 к безразмерному (нормализованному) виду, используя преобразование

$$\frac{k_{ij} - k_j^{\min}}{k_j^{\max} - k_j^{\min}}, \quad (1)$$

где k_{ij} – элементы матрицы (3), расположенные в i -й строке и в j -м столбце;

$k_j^{\min}$ – минимальное значение, k_j ;

$k_j^{\max}$ – максимальное значение k_j .

Для критерия k_5 с отрицательным влиянием преобразование имеет вид:

$$\frac{k_j^{\max} - k_{ij}}{k_j^{\max} - k_j^{\min}}. \quad (2)$$

В результате получаем нормализованную матрицу

Альтернатива	k_1	k_2	k_4	k_5
K1	0,00	0,00	0,00	0,38
K2	0,60	1,00	1,00	0,00
K3	1,00	0,00	0,00	1,00

(3)

Матрицу (3) можно упростить, исключив неоптимальные альтернативы. Для этого выделим оптимальное, по Парето, множество альтернатив, используя, например, метод прямоугольника [6]. В матрице (3) элементы, принадлежащие парето-оптимальным альтернативам, выделены тонированием. Таким образом, альтернатива K1 не является оптимальной и исключается из дальнейшего рассмотрения, а альтернативы K2, K3 образуют парето-оптимальное множество, из которого необходимо найти единственное оптимальное решение.

Таким образом, после этапа предварительной обработки данных произведено сокращение размерности исходной матрицы, что упрощает решение задачи о ранжировании (важности) альтернатив. В результате получаем следующую матрицу

Альтернатива	k_1	k_2	k_4	k_5
K2	0,6	1,0	1,0	0,0
K3	1,0	0,0	0,0	1,0

(4)

Представление значений критериев k_1, k_2, k_4, k_5 для каждой из альтернатив K2, K3 в виде нормализованной матрицы (3) однозначно определяет тип задачи для выбора наилучшей альтернативы как многокритериальной задачи теории принятия решений [6]. Проанализировав существующие методы решения подобных задач, сделали выбор в пользу самого эффективного и современного метода – метода анализа иерархий (далее – МАИ). Уникальность и специфическая особенность МАИ состоит во встроенной в алгоритм решения процедуре оценивания результатов попарного экспертного оценивания, что позволяет исключить влияние субъективной составляющей на итог решения. При нахождении противоречий в оценках эксперту предлагается изменить свое мнение и заново провести оценивание. За счет этого повышается объективность принятия решения. Решение задачи по МАИ состоит в создании матриц попарных сравнений по критериям k_1, k_2, k_4, k_5 для каждой из альтернатив K1, K2, используя шкалу сравнений, представленную в табл. 2.

В результате попарного сравнения альтернатив по критерию k_1 (диаметр просверливаемого отверстия) получаем матрицу (5).

Таблица 2

Шкала сравнений

Оценка	Описание
1	Одинаковое предпочтение
3	Умеренное предпочтение
5	Явное предпочтение
7	Очевидное предпочтение
9	Исключительное предпочтение

k_1 – диаметр отверстия	K2	K3	(5)
K2	1	$\frac{1}{7}$	
K3	7	1	
Сумма оценок	8	$1\frac{1}{7}$	

Аналогичную процедуру проделываем для остальных критериев k_2 , k_4 , k_5 . Результаты попарного сравнения альтернатив по критериям k_2 , k_4 , k_5 представлены в матрицах (6), (7) и (8) соответственно.

k_2 – диаметр трубопровода	K2	K3	(6)
K2	1	9	
K3	$\frac{1}{9}$	1	
Сумма оценок	$1\frac{1}{9}$	10	

k_4 – давление	K2	K3	(7)
K2	1	9	
K3	$\frac{1}{9}$	1	
Сумма оценок	$1\frac{1}{9}$	10	

k_5 – масса	K2	K3	(8)
K2	1	$\frac{1}{9}$	
K3	9	1	
Сумма оценок	10	$1\frac{1}{9}$	

Правила заполнения матриц следующие: на главную диагональ помещаем 1, затем ставим оценку по шкале предпочтений сначала в верхнюю (или нижнюю) часть матрицы, а затем в нижнюю (или верхнюю) часть матрицы ставим симметрично оценку, обратную заполненным ранее. То есть все матрицы попарных сравнений имеют единичную главную диагональ и являются антисимметричными. Для наглядности заполнения матриц по шкале предпочтений обратные величины оценок записаны в виде обыкновенных дробей.

Матрицы (5) – (8) нормализуем, производя деление каждого элемента матриц на сумму оценок соответствующего столбца. Нормализованное попарное сравнение критериев k_1 , k_2 , k_4 представлено в матрицах (9) – (12) соответственно.

k_1 – диаметр отверстия	K2	K3	Среднее значение
K2	0,125	0,125	0,125
K3	0,875	0,875	0,875

(9)

k_2 – диаметр трубопровода	K2	K3	Среднее значение
K2	0,9	0,9	0,9
K3	0,1	0,1	0,1

(10)

k_4 – давление	K2	K3	Среднее значение
K2	0,9	0,9	0,9
K3	0,1	0,1	0,1

(11)

k_5 – масса	K2	K3	Среднее значение
K2	0,1	0,1	0,1
K3	0,9	0,9	0,9

(12)

Далее рассчитываем весовые коэффициенты альтернатив K2, K3 как среднее по каждой строке в матрицах (9) – (12). Полученные значения представлены в последнем столбце указанных матриц. Значения весовых коэффициентов, расположенных в крайнем правом столбце, показывают относительную приоритетность каждого объекта (каждой альтернативы K2, K3) по каждому техническому показателю (каждому критерию k_1 , k_2 , k_4 , k_5).

Для проверки согласованности назначения предпочтений (согласно табл. 2) предусмотрена процедура вычисления коэффициента согласованности (непротиворечивости суждений лица, устанавливающего предпочтение). Для этого вычисляем индекс согласованности ИС, равный 1, по формуле

$$\text{ИС} = \frac{\lambda - n}{n - 1}, \quad (13)$$

где λ – среднее значение меры согласованности;

n – количество рассматриваемых альтернатив,

и выбираем индекс рандомизации (случайного выбора) ИР из табл. 3, а затем находим отношение $\frac{ИС}{ИР}$.

Таблица 3

Индекс рандомизации

Количество альтернатив	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ИР	0	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Поскольку индекс рандомизации при $n=2$ равен 0, проверку согласованности назначения предпочтений не производим.

Выполним аналогичную процедуру попарного сравнения для критериев. Результаты попарного сравнения критериев представлены в матрице (14).

Критерии	k_1	k_2	k_4	k_5	Сумма	Среднее значение	Локальный вектор приоритетов критериев
k_1	1	3	7	1	12,00	3,00	0,350
k_2	$\frac{1}{3}$	1	3	$\frac{1}{7}$	4,47	1,11	0,130
k_4	$\frac{1}{7}$	$\frac{1}{3}$	1	$\frac{1}{7}$	1,61	0,40	0,047
k_5	1	7	7	1	16,00	4,00	0,470
Сумма	2,47	11,33	18,00	2,29		8,51	1,000

(14)

Локальный вектор приоритетов каждого критерия получен как нормализованное среднее значение сравниваемых элементов в крайнем правом столбце матрицы (14).

Поскольку матрица (14) имеет размерность 4×4 ($n = 4$), то процедура попарного сравнения критериев обязательна. Для этого вычисляем индекс согласованности по формуле (13).

Вычислим как сумму произведений каждого элемента локального вектора приоритетов на соответствующую сумму приоритетов столбца матрицы (14)

$$\lambda = 0,335 \cdot 2,47 + 0,13 \cdot 11,33 + 0,047 \cdot 18 + 0,47 \cdot 2,29 = 4,26.$$

$$\text{Тогда } ИС = \frac{4,26 - 4}{3} = 0,086.$$

Согласно табл. 3 индекс рандомизации ИР = 0,9 при $n = 4$.

Зная индексы согласованности и рандомизации, найдем отношение согласованности ОС

$$ОС = \frac{ИС}{ИР} = \frac{0,086}{0,9} = 0,096.$$

Содержательный смысл отношения согласованности состоит в том, что оно показывает степень осмысленного выбора экспертом предпочтений (по шкале предпочтений). Если $ОС \leq 0,1$, то выбранные предпочтения корректны, согласованы и непротиворечивы. Если $ОС > 0,1$, то эксперту надлежит вернуться к процедуре выбора предпочтений и пересмотреть свое мнение относительно назначения предпочтений. В нашем случае $ОС < 0,1$, поэтому предпочтения выбора корректны.

Заключительный этап МАИ состоит в вычислении рейтингов альтернатив. Для этого составляем матрицу (15) средних значений критериев, взятых из матриц (9)–(12), с присоединенным вектором – столбцом локальных приоритетов критериев. Сумма произведений средних значений критериев на элементы вектора приоритетов критериев по каждой альтернативе дает взвешенное среднее значение рейтинга альтернативы.

Так, для альтернативы К2 взвешенный средний рейтинг равен $0,350 \cdot 0,125 + 0,130 \cdot 0,900 + 0,047 \cdot 0,900 + 0,470 \cdot 0,100 \approx 0,250$, а для альтернативы К3 – $0,350 \cdot 0,825 + 0,130 \cdot 0,100 + 0,047 \cdot 0,100 + 0,470 \cdot 0,900 \approx 0,750$.

Критерий	Локальный вектор приоритетов	Значение критериев	
		К2	К3
k_1	0,350	0,125	0,875
k_2	0,130	0,900	0,100
k_4	0,047	0,900	0,100
k_5	0,470	0,100	0,900
Взвешенные средние рейтинги альтернатив		0,250	0,750

(15)

Из расчетов следует, что рейтинговый ряд приоритетов альтернатив имеет вид 0,75 (К3), 0,25 (К2), 0,00 (К1).

Следовательно, наиболее приоритетной является альтернатива К3 (устройство отбора воды ОСА), далее расположены РГ-2-1 и ГП-3.

В 2019–2020 гг. ГБУ «НИИ «Респиратор» выполнена научно-исследовательская работа, в которой проведен анализ средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода, находящихся на оснащении в подразделениях ГВГСС, и установлено, что:

- гидрант – пистолет ГП-3 имеет ограниченное применение в шахтах и на практике не применяется;

- промежуточное подсоединение с гидравлическим редуктором РГ-2 применяется редко;

- устройство ОСА – самое используемое, является основным средством забора воды при оперативном вскрытии пожарно-оросительного трубопровода.

Таким образом, результаты расчета подтверждаются фактическим рейтингом (важностью) средств забора воды.

Выводы. Выполнено ранжирование (упорядочение) средств забора воды по степени важности. Результаты полностью подтверждаются ранее проведенными исследованиями. Наиболее высокий рейтинг получило устройство ОСА.

Положительные результаты применения метода анализа иерархий позволяют рекомендовать его для научного обоснования номенклатуры средств механизации с целью повышения эффективности ведения горноспасательных работ.

Список литературы / References

1. Костров, А. В. Номенклатура технического оснащения спасательных формирований: методика ранжирования технических объектов (обоснование обобщенных критериев) / А. В. Костров, Ю. А. Онищенко // Технология гражданской безопасности. – 2019. – Т. 16, № 1(59). – С. 48 – 51.

Kostrov A. V., Onishchenko Yu. A. *Nomenklatura tekhnicheskogo osnashcheniya spasatelnykh formirovaniy: metodika ranzhirovaniya tekhnicheskikh obyektov (obosnovaniye obobshchyennykh kriteriyev)* [Set of technical equipment of rescue units: technique of categorization of technical objects (substantiation of generalized criteria)]. *Tekhnologiya grazhdanskoy bezopasnosti*, 2019, vol. 16, no. 1(59), pp. 48-51. (In Russian)

2. Костров, А. В. Номенклатура технического оснащения спасательных формирований: методика ранжирования объектов техники (постановка задачи) / А. В. Костров, Ю. А. Онищенко // Технология гражданской безопасности. – 2018. – Т. 15, № 4(58). – С. 80 – 83.

Kostrov A. V., Onishchenko Yu. A. *Nomenklatura tekhnicheskogo osnashcheniya spasatelnykh formirovaniy: metodika ranzhirovaniya obyektov tekhniki (postanovka zadachi)* [Set of technical equipment of rescue units: technique of categorization of technical objects (statement of the problem)]. *Tekhnologiya grazhdanskoy bezopasnosti*, 2018, vol. 15, no. 4(58), pp. 80-83. (In Russian)

3. Костров, А. В. О подходах к обоснованию технического оснащения спасательных формирований МЧС России / А. В. Костров, Ю. А. Онищенко // Технология гражданской безопасности. – 2018. – Т. 15, № 2(56). – С. 76 – 80.

Kostrov A. V., Onishchenko Yu. A. *O podkhodakh k obosnovaniyu tekhnicheskogo osnashcheniya spasatelnykh formirovaniy MChS Rossii* [On approaches to

substantiation of technical equipment of rescue units of EMERCOM of Russia]. *Tekhnologiya grazhdanskoy bezopasnosti*, 2018, vol. 15, no. 2(56), pp. 76-80. (In Russian)

4 Сараев, И. В. Методика обоснования технического оснащения подразделений МЧС России для ликвидации чрезвычайных ситуаций на автомобильном транспорте : автореферат ... кандидата технических наук / И. В. Сараев. – Иваново, 2019. – 23 с.

Sarayev I. V. *Metodika obosnovaniya tekhnicheskogo osnashcheniya podrazdeleniy MChS Rossii dlya likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy na avtomobilnom transporte : avtoreferat ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Methodology of substantiation of technical equipment of EMERCOM of Russia for elimination of emergency situations on automobile transportation: author's abstract of Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 2019, 23 p. (In Russian)

5. Филановский, А. М. Методика комплексной оценки эффективности аварийно-спасательного инструмента, применяемого при ликвидации чрезвычайных ситуаций на транспорте : автореферат ... кандидата технических наук / А. М. Филановский. – СПб., 2013. – 23 с.

Filanovskiy A. M. *Metodika kompleksnoy otsenki effektivnosti avariyno-spasatel'nogo instrumenta, primenyayemogo pri likvidatsii chrezvychaynykh situatsiy na transporte : avtoreferat ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Methodology of complex evaluation of effectiveness of rescue equipment applied in elimination of emergencies on transportation: author's abstract of Cand. tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, 2013, 23 p. (In Russian)

6. Воробьева, Е. Е. Теория принятия решений / Е. Е. Воробьева, В. Ю. Емельянов. – СПб. : Балтийский государственный технический университет, 2018. – 136 с.

Vorobyeva Ye. Ye., Yemelyanov V. Yu. *Teoriya prinyatiya resheniy* [Decision making theory]. Saint-Petersburg, Baltiyskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet Press, 2018, 136 p. (In Russian)

7. Гржибовский, А. М. Корреляционный анализ / А. М. Гржибовский // Экология человека. – 2008. – № 9. – С. 50 – 60.

Grzhibovskiy A. M. *Korrelyatsionnyy analiz* [Correlation analysis]. *Ekologiya cheloveka*, 2008, no. 9, pp. 50-60. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 02.02.2022
Дата опубликования 17.03.2022

Georgy Ivanovich Peftibay, head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;

Nikolay Aleksandrovich Galukhin, senior scientific associate; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru;

Andrey Viktorovich Ivakhnenko, engineer; e-mail: andrey_ivahnenko@mail.ru

State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"

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

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-36

SUBSTANTIATION FOR SELECTION A SET OF MINE- RESCUE ENGINEER EQUIPMENT EXEMPLIFIED BY WATER DRAFTING TOOLS

Purpose. To substantiate the selection of the set of tools for water drafting from firefighting-sprinkler pipeline in order to improve effectiveness of the mine-rescue operations.

Methods. Information and calculation-based analytical investigations.

Results. The categorization of water drafting tools according to their priority has been completed applying the hierarchy analysis technique. The calculations are completely supported by the results of the previously conducted scientific research.

Scientific novelty. The novel categorization of the tools of water drafting from firefighting-sprinkler pipeline has been conducted applying the hierarchy analysis technique and structuring the objective – criteria – alternatives type of problem, the numerical calculations for determination of priority have been fulfilled.

Practical value. The positive results of the categorization of the tools for water drafting from the firefighting-sprinkler pipeline permit to recommend the hierarchy analysis technique for determining the set of the mine-rescue engineer equipment which will improve efficiency of deployment of the mine-rescue subdivisions and effectiveness of carrying out the rescue operations.

Keywords: *list; selection technique; mine-rescue works; water drafting tools; hierarchy analysis technique; categorization.*

УДК 614.841.332:678.763.2**Виктория Валентиновна Лебедева**, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru*Государственное бюджетное учреждение**«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»**283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 856) 332-78-55*

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ВСПУЧИВАНИЯ ОГНЕЗАЩИТНОГО ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ХЛОРОПРЕНОВОГО КАУЧУКА

Цель. Обосновать параметры процесса вспучивания огнезащитного покрытия для последующей оценки его огнезащитной эффективности в условиях пожара.

Методы. Кратность вспучивания определяли, измеряя линейные размеры образцов до и после выдержки в изотермических условиях нагревания, потерю массы – весовым методом, изменение плотности и пористости кокса – расчетным методом на основании экспериментальных данных; использовали графический метод обработки результатов однофакторного эксперимента.

Результаты. Исследовано влияние температуры в диапазоне 300...950 К на изменение кратности вспучивания, массы, плотности и пористости кокса огнезащитного покрытия на основе хлоропренового каучука. Показано, что исследуемые параметры определяются как функции температуры. Проанализирован двухстадийный механизм процесса вспучивания огнезащитного покрытия.

Научная новизна. Впервые получены численные значения параметров вспучивания огнезащитного покрытия на основе хлоропренового каучука и установлены зависимости, характеризующие влияние температуры на эти параметры.

Практическая значимость. Основываясь на результатах исследования, установлены математические зависимости кратности вспучивания, изменения массы, плотности и пористости кокса огнезащитного покрытия от температуры для использования в качестве оценочных критериев при разработке рецептуры и дальнейшей оптимизации свойств покрытий для защиты строительных конструкций в условиях экстремальных тепловых воздействий.

Ключевые слова: *вспененный кокс; кратность вспучивания; огнезащитное покрытие; плотность; пористость; потеря массы.*

Постановка проблемы. Снижение пожарной опасности строительных материалов и конструкций достигается повышением их огнестойкости к воздействию пожаров различной интенсивности и продолжительности. Понятие огнестойкости строительных конструкций подразумевает способность конструкции сохранять несущие и (или) ограждающие функции в условиях пожара и количественно определяется временем достижения предельной температуры, при которой прочность материала конструкции снижается. Один из наиболее эффективных способов решения проблемы повышения огнестойкости строительных конструкций – применение огнезащитных вспучивающихся покрытий, имеющих ряд преимуществ перед обычными материалами. Образующийся в результате вспучивания вспененный кокс

служит защитным барьером между подложкой и газовой средой пожара за счет его низкой плотности и теплопроводности. Разработка рецептур огнезащитных покрытий и последующие огневые испытания конструкций, обработанных специальными составами, требуют воспроизведения полномасштабных условий пожара, а также теоретических методов исследования для определения оптимальных параметров противопожарной защиты.

Так как проводить полномасштабные эксперименты довольно сложно и дорого, большую часть исследований выполняют с использованием лабораторных испытательных стендов. В этом случае объектами исследования являются малогабаритные образцы материалов и конструктивные элементы, а смоделированные параметры тепловой нагрузки эквивалентны условиям при реальных пожарах. Такой подход имеет определенные преимущества, так как позволяет воспроизводить результаты испытаний, снижает материальные и временные затраты, предоставляет больше информации и, следовательно, может быть использован для решения проблемы оптимизации параметров и повышения эффективности огнезащитных покрытий.

Анализ последних исследований. К настоящему времени накоплен значительный экспериментальный материал по определению отдельных параметров огнезащитных покрытий [1, 2]. Вместе с тем расширение сферы применения огнезащитных составов, возросшие нормативные требования к огнезащите зданий и сооружений требуют разработки более эффективных материалов, дальнейшего исследования их физико-механических свойств, лабораторных и стендовых испытаний для оценки эксплуатационных параметров и прогнозирования огнезащитной эффективности покрытий в условиях пожара [3 – 5].

Цель исследований. Обосновать параметры процесса вспучивания огнезащитного покрытия для последующей оценки его огнезащитной эффективности в условиях пожара.

Результаты исследований. Современные огнезащитные покрытия вспучивающегося типа характеризуются кратностью вспучивания до 20...40 единиц, пористостью кокса 0,95...0,98 единицы, плотностью – 30...50 кг·м⁻³ и коэффициентом теплопроводности – 0,04...0,1 Вт·м⁻¹·К⁻¹ [6].

Рецептуры используемых на практике огнезащитных составов отличаются большим многообразием, следовательно, и физико-химические процессы, сопровождающие создание защитного слоя, различные. В то же время огнезащитные покрытия вспучивающегося типа имеют общую особенность, которая заключается в механизме образования внешнего изоляционного слоя **за счет** увеличения толщины (объема) покрытия при нагревании. Поэтому при их изучении логично опираться на параметры, которые характеризуют процесс вспучивания и могут быть численно получены в рамках лабораторного эксперимента. В качестве таких целевых параметров в настоящей работе

исследованы кратность вспучивания, потеря массы, плотность и пористость вспененного кокса после изотермического нагревания образцов.

Образцы огнезащитного покрытия готовили следующим образом. В органический раствор хлоропренового каучука вводили функциональные составляющие: вспенивающие агенты, наполнители, краситель, после чего композицию тщательно перемешивали и тонким слоем $(0,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-3}$ м заливали в форму размером $(65 \times 30 \times 15) \cdot 10^{-3}$ м, изготовленную из алюминиевой фольги.

После образования отвержденного покрытия образцы выдерживали в муфельной печи в течение 20 мин при заданной температуре, которая поддерживалась автоматически. Диапазон температуры нагревания составил 300...950 К с шагом 50 К. После выдержки образцов в муфельной печи измеряли высоту h и определяли массу m вспученного слоя покрытия.

Кратность вспучивания δ , изменение массы $\bar{m}$ и кратности вспучивания $\bar{\delta}$ в процессе нагревания образца рассчитывали по формулам [6]

$$\delta = \frac{h - h_0}{h_0},$$

где h – высота слоя покрытия после нагревания, м;

h_0 – первоначальная высота (толщина) слоя покрытия, м;

$$\bar{m} = \frac{m}{m_0},$$

где m – масса образца после нагревания, кг;

m_0 – первоначальная масса образца, кг;

$$\bar{\delta} = 1 + \delta.$$

Расчет плотности ρ и пористости φ вспененного кокса проводили по формулам [6]

$$\rho = \frac{\rho_0 \bar{m}}{1 + \delta},$$

где ρ_0 – начальная плотность образца, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

$$\varphi = 1 - \frac{\bar{m}}{1 + \bar{\delta}}. \quad (1)$$

При определении пористости по формуле (1) полагали, что пористость вспененного кокса обусловлена только изменением потери массы и кратности вспучивания материала огнезащитного покрытия.

В зависимости от температуры нагревания наблюдали различные состояния покрытия. При температуре 500 К изменение вспучивания составило 12,5 раза при компактной и сравнительно плотной структуре материала, при более высоких температурах (более 500 К) имело место увеличение вспучивания в 13...40 раз с образованием внутренних участков с упорядоченной сетью пор. Однако при этом кокс оказался рыхлой структуры в виде вытянутых вспученных волокон.

Таким образом, каждой температуре соответствуют определенный объем, структура и масса образца материала. Полученные зависимости параметров вспененного кокса от температуры удовлетворительно аппроксимированы уравнениями полинома второго порядка с достоверностью аппроксимации $r = 0,92...0,98$. Выбор вида функциональной зависимости основывался на максимальных значениях коэффициента корреляции.

Ниже представлена зависимость изменения кратности вспучивания покрытия на основе хлоропренового каучука от температуры нагревания образца (рис. 1).

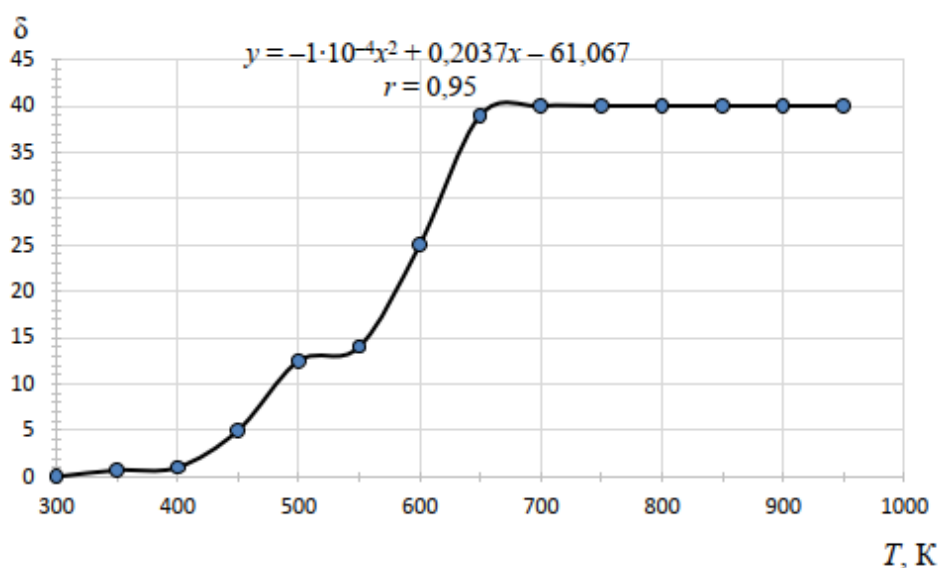


Рис. 1. Зависимость кратности вспучивания от температуры

Процесс вспучивания исследуемого покрытия состоит из двух стадий (см. рис. 1). Первой стадии вспучивания соответствует диапазон температуры 400...550 К, второй – 550...650 К. Далее кривая вспучивания выходит на плато с практически постоянными значениями кратности вспучивания 39,8...40 единиц. Высота первого плато составляет примерно 14 единиц, это определенное преимущество состава, так как сильнее блокируется процесс переноса тепла при низких температурах.

Расширение покрытия начиная с температуры 550 К имеет резкий характер. Интенсивное изменение массы происходит в диапазоне температуры 700...900 К, при этом конечный выход кокса составляет 0,5 единицы (рис. 2).

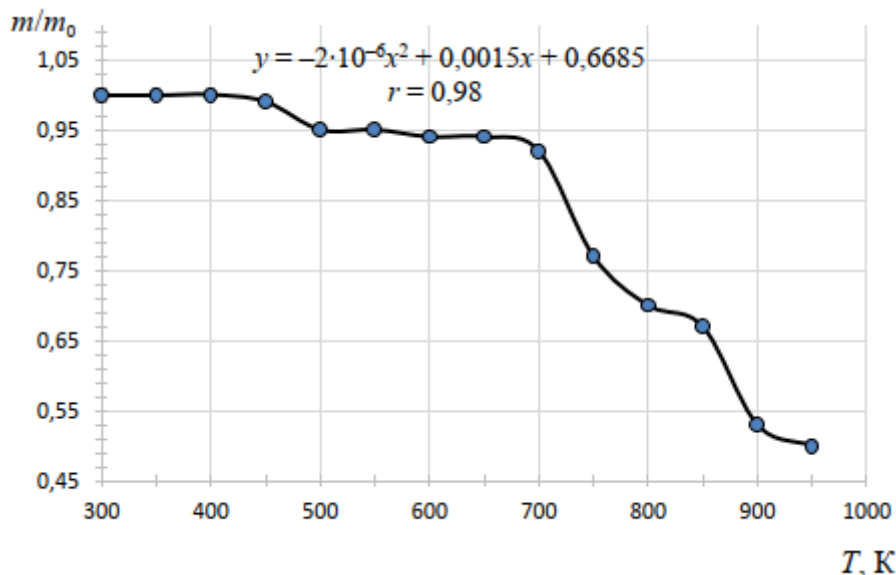


Рис. 2. Зависимость изменения массы от температуры

Волнообразный характер кривой изменения массы можно объяснить многостадийностью протекания термической деструкции материала покрытия.

Следует отметить, что для покрытия в начальный период преобладает вспучивание над выделением газообразных продуктов. Так, при температуре 500 К и потере массы 5 % имеет место 13-кратный рост толщины слоя покрытия. Это главный механизм, ответственный за формирование огнезащитных свойств покрытия. На рис. 3 показано, что изменение плотности кокса составляет 16 раз на первой стадии вспучивания, на второй – всего 3 раза.

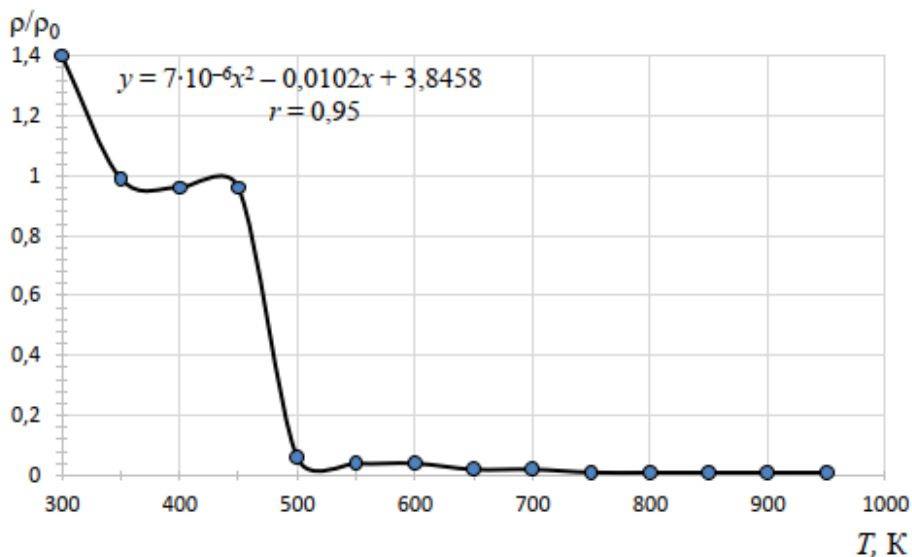


Рис. 3. Зависимость изменения плотности кокса от температуры

Кривая зависимости пористости кокса от температуры нагревания образца (рис. 4) имеет резкий рост значений в диапазоне 0,04...0,9 единицы на первой стадии вспучивания. Конечное значение пористости кокса составляет 0,98...0,99 единицы.

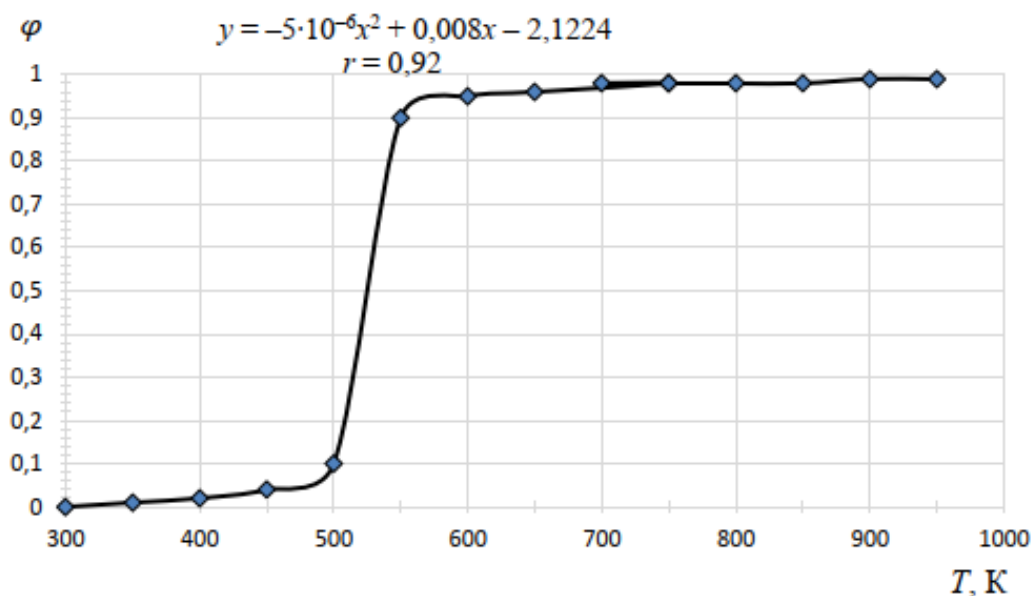


Рис. 4. Зависимость пористости кокса от температуры

В условиях нестационарной теплопередачи, когда поле температур в твердом теле изменяется не только в пространстве, но и во времени, толщина вспученного слоя значительно влияет на огнезащитную способность покрытия. Увеличение коэффициента вспучивания до 40 единиц можно отнести к определенному преимуществу огнезащитного состава. Однако дальнейшее увеличение толщины слоя (объема) кокса нецелесообразно, так как это приводит к усилению радиационного переноса тепла в пористой среде, следовательно, к возможному снижению механической и когезионной прочности кокса ввиду нарушения целостности структуры.

Логично предположить, что для повышения огнезащитной эффективности покрытия наиболее действенно снижение потери массы, повышение плотности и прочности вспененного кокса при высоких температурах.

Анализ представленных результатов показывает принципиальную возможность установления параметров вспененного кокса в качестве комплексного критерия оценки эффективности огнезащитных покрытий.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Исследованы свойства и определены параметры кокса, образующегося в результате нагревания и вспучивания огнезащитного покрытия на основе хлоропренового каучука. Установлены аналитические зависимости, характеризующие

изменение кратности вспучивания, потери массы, плотности и пористости вспененного кокса от температуры, что позволяет уточнить структуру и прочность кокса на различных стадиях термического нагревания.

Дальнейшие исследования предполагают накопление данных аналогичных экспериментов с разными огнезащитными составами для получения обобщенных параметров, влияющих на огнезащитную эффективность покрытий.

Список литературы / References

1. 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., Volfson S. I., Mikhaylov S. N. *Termorasshiryayushchiyesya polimernyye kompozitsionnyye materialy* [Intumescent polymeric composition materials]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 5, pp. 60-63. (In Russian)

2. Gérard, C., Fontaine G., Bellayer S., Bourbigot S. Reaction to fire of an intumescent epoxy resin: Protection mechanisms and synergy. *Polymer Degradation and Stability*, 2012, vol. 97(8), pp. 1366-1386. (In English)

3. Fan, Z., Zhang Y., Jiang Y., Luo Z., He Y., Zhang Q. Polymer composites with high energy density and charge-discharge efficiency at high temperature using aluminum oxide particles. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, vol. 18, pp. 4367-4374. (In English)

4. Hodgin, D. A. Midrise wood frame construction: a good idea or are we asking for trouble? // Eighth Congress on Forensic Engineering (November 29 –December 2, 2018, Austin, Texas). Reston, Virginia: American Society of Civil Engineers, 2018, pp. 62-72. (In English)

5. Еремина, Т. Ю. Проблемы и перспективы в области огнестойкости деревянных конструкций для высотных зданий / Т. Ю. Еремина, Ф. А. Портнов // Пожаровзрывобезопасность. – 2020. – Т. 29, № 2. – С. 34 – 43.

Yeremina T. Yu., Portnov F. A. *Problemy i perspektivy v oblasti ognestoykosti derevyannykh konstruktsiy dlya vysotnykh zdaniy* [Challenges and prospects in the field of fire resistance of wooden constructions for high-rise buildings]. *Pozharovzryvobezopasnost*, 2020, vol. 29, no. 2, pp. 34-43. (In Russian)

6. Зверев, В. Г. Исследование свойств и огнезащитной эффективности вспучивающихся покрытий / В. Г. Зверев, А. В. Теплоухов, А. Ф. Цимбалюк // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2014. – Т. 57, № 8/2. – С. 148 – 153.

Zverev V. G., Teploukhov A. V., Tsimbalyuk A. F. *Issledovaniye svoystv i ognezashchitnoy effektivnosti vspuchivayushchikhsya pokrytiy* [Investigation

of properties and fire-protection effectiveness of the intumescent coatings]. *Izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Fizika*, 2014, vol. 57, no. 8/2, pp. 148-153. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 28.10.2022
Дата опубликования 17.03.2023

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

State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"

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

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-55

QUANTITATIVE PARAMETERS OF INTUMESCENCE OF CHLOROPRENE RUBBER-BASED FLAME-RETARDANT COATING

Purpose. To substantiate the parameters of intumescence process of the flame-retardant coating for further evaluation of its fire-proof effectiveness in conditions of fire.

Methods. The intumescence ratio has been determined by measuring the linear dimensions of samples before and after exposing them to heating conditions, the mass loss has been measured by weight method, the changes in density and porosity of coke have been derived by calculation based in the experimental data; the graphical technique of processing the single factor experiment data.

Results. The temperature influence on the changes in following parameters of the chloroprene rubber-based flame-retardant coating has been investigated within the range of 300...950 K: intumescence ratio, mass, density and porosity of coke. It has been demonstrated that the parameters in question are defined as temperature functions. The two-stage mechanism of the intumescence process of the flame-retardant coating has been analyzed.

Scientific novelty. The novel numerical values of the parameters of the chloroprene rubber-based flame-retardant coating have been obtained and the dependences characterizing the temperature influence on these parameters have been determined.

Practical value. Based on the investigation results the mathematical dependences between the temperature and the intumescence ratio, the changes in mass and the variations of density and porosity of coke of the flame-retardant coating have been determined in order to be applied as evaluation criteria in development of formulae and further optimization of properties of the coatings for protection of the building constructions in conditions of extreme heat exposure.

Keywords: foamed coke; intumescence ratio; flame-retardant coating; density; porosity; mass loss.

УДК 622.82:614.841.13

*Евгений Александрович Головченко, нач. отд.; e-mail: ennio_80@mail.ru;**Дмитрий Иванович Момот, науч. сотр.; e-mail: dimsience@mail.ru;**Виктория Владимировна Карасёва, инж. I кат.; e-mail: obep.niigd@list.ru**Государственное бюджетное учреждение**«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»**283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+7 949) 340-97-96*

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИДОВ СГОРАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРАХ

Цель. Апробация метода идентификации видов сгорающих веществ при подземных пожарах на основе данных газового состава шахтного воздуха для установления реальных причин пожара.

Методы. Аналитический расчет параметра K_p , характеризующего вид сгорающего вещества (уголь, дерево, метан) на основании данных анализа газовых проб шахтного воздуха (поступающей и исходящей струи воздуха) в очаге пожара.

Результаты. На основании данных о происшедших подземных пожарах на шахтах Донбасса определен параметр K_p , характеризующий вид сгорающего вещества (уголь, дерево, метан) и его соответствие реальной причине пожара.

Научная новизна. Идентификация видов сгорающих веществ (уголь, дерево, метан) в очаге подземного пожара по данным о газовом составе шахтного воздуха.

Практическая значимость. Метод идентификации видов сгорающих веществ позволит оперативно выбрать способ ликвидации подземного пожара и необходимые технические средства.

Ключевые слова: *подземный пожар; уголь; дерево; метан; шахтный воздух; сгорающее вещество.*

Постановка проблемы. Аварийная обстановка в шахте обычно требует принятия однозначного решения о способах и средствах ее ликвидации.

Один из видов аварий в угольных шахтах – пожары эндогенного или экзогенного характера. Основную опасность подземных пожаров представляют отравления или удушения работающих в подземных условиях людей распространяющимися по горным выработкам газообразными продуктами горения. При подземных пожарах, особенно в труднодоступных местах, зачастую единственный информационный источник – состав пожарных газов [1]. Имея эти данные, можно установить природу и количество сгорающих веществ.

Проведенные в данной области исследования позволяют определить массовую долю сгорающего угля и метана при их совместном горении.

Однако существующие методы не позволяют в условиях подземных пожаров достоверно определить наличие горения древесины [1, 2], что может отразиться на тактике ведения горноспасательных работ и способах ликвидации возникшей аварии. Также необходимо учитывать параметры, влияющие на определение концентраций продуктов сгорания шахтных веществ: расход воздуха,

температура, влажность, скорость выгорания вещества; контролировать концентрации газов, характеризующих именно очаг пожара, или их удельное выделение и учитывать фоновую концентрацию анализируемых пожарных газов.

Таким образом, возникла необходимость установления критериев и идентификации трех сгорающих одновременно веществ различной природы (дерево, уголь, метан), а также описания процессов их горения, что позволит определить вид сгорающих веществ при подземных пожарах.

Анализ последних исследований и публикаций. Основным источником информации о состоянии очага самонагревания или горения шахтных веществ – состав шахтного воздуха, основу которого составляет атмосферный воздух, поступающий в горные выработки.

Наиболее характерные газы для мониторинга шахтного воздуха в горной выработке: углеродсодержащие оксиды CO и CO₂, водород H₂, кислород O₂, углеводороды C₁ – C₄ (метан CH₄, этан C₂H₆, пропан C₃H₈, этилен C₂H₄, ацетилен C₂H₂) [1–3].

Для установления вида сгорающих веществ при подземных пожарах разными исследователями предложено определять ожидаемые значения концентрации оксида углерода при воспламенении резинотехнических изделий и деревянных элементов крепи в горной выработке с учетом микроконцентраций оксида углерода в шахтном воздухе, скорости воздуха и скорости выгорания материала [4, 5], устанавливать факт горения метана или угля или их совместное горение с учетом скорости воздуха в исходящей струе, концентрации оксида углерода по ходу вентиляционной струи и концентрации кислорода [5, 6], определять вид сгорающего вещества по соотношению прироста диоксида углерода к убыли кислорода на исходящей струе [6].

В работах [4, 6] рассчитывают параметр K_p^{Φ} , основанный на анализе стехиометрических уравнений материального баланса процесса горения твердых веществ и метана и сопоставления фактической убыли кислорода в шахтном воздухе при пожаре с его потреблением.

Цель статьи. Выполнить апробацию метода определения вида сгорающих веществ при подземных пожарах на основе реальных данных газового состава шахтного воздуха пожарных участков угольных шахт Донбасса.

Результаты исследований. Метод идентификации вида сгорающих веществ при подземных пожарах основан на определении параметра K_p , характеризующего вид сгорающего вещества (уголь, дерево, метан), используя данные анализа газовых проб шахтного воздуха на аварийном участке, который рассчитывают по формуле

$$K_p = (\text{CO}_2 - \text{CO}_2^n) / (\text{O}_2^n \text{ N}_2 / \text{N}_2^n - \text{O}_2), \quad (1)$$

где CO_2 , O_2 – концентрации диоксида углерода и кислорода соответственно, %, в исходящей струе газовойоздушного потока на аварийном пожарном участке определяют по показаниям газоаналитических приборов (газоанализаторов), состоящих на оснащении подразделений Государственной военизированной горноспасательной службы МЧС ДНР (далее – ГВГСС МЧС ДНР), или по данным разделки проб воздуха оперативной аварийной газоаналитической лабораторией (находящейся в момент аварии на шахте);

$\text{CO}_2^{\text{п}}$, $\text{O}_2^{\text{п}}$ – концентрации диоксида углерода и кислорода соответственно, %, в поступающей на аварийный участок струе газовойоздушного потока определяют по показаниям газоаналитических приборов (газоанализаторов), состоящих на оснащении подразделений ГВГСС МЧС ДНР, или по данным разделки проб воздуха оперативной аварийной газоаналитической лабораторией (находящейся в момент аварии на шахте);

N_2 – концентрация азота в исследуемой пробе, %, в исходящей струе газовойоздушного потока на аварийном пожарном участке; ее определяют по формуле

$$\text{N}_2 = 100 - (\text{O}_2 + \text{CO} + \text{CO}_2 + \text{CH}_4), \quad (2)$$

где CO , CO_2 , CH_4 – концентрации оксида углерода, диоксида углерода и метана соответственно, %, в исходящей струе газовойоздушного потока на аварийном участке определяют по показаниям газоаналитических приборов (газоанализаторов), состоящих на оснащении подразделений ГВГСС МЧС ДНР, или по данным разделки проб воздуха оперативной аварийной газоаналитической лабораторией (находящейся в момент аварии на шахте);

$\text{N}_2^{\text{п}}$ – концентрация азота в исследуемой пробе, %, в поступающей струе газовойоздушного потока на аварийный участок; ее определяют по формуле

$$\text{N}_2^{\text{п}} = 100 - (\text{O}_2^{\text{п}} + \text{CO}^{\text{п}} + \text{CO}_2^{\text{п}} + \text{CH}_4^{\text{п}}), \quad (3)$$

$\text{CO}^{\text{п}}$, $\text{CO}_2^{\text{п}}$, $\text{CH}_4^{\text{п}}$ – концентрации оксида углерода, диоксида углерода и метана соответственно, %, в поступающей на аварийный участок струе газовойоздушного потока определяют по показаниям газоаналитических приборов (газоанализаторов), состоящих на оснащении подразделений ГВГСС МЧС ДНР, или, по данным разделки проб воздуха оперативной аварийной газоаналитической лабораторией (находящейся в момент аварии на шахте).

Параметр K_p , характеризующий вид сгорающего вещества, может принимать следующие значения:

$K_p < 0,4$ – горит уголь, при значениях $K_p = 0,1 - 0,2$ имеет место эндогенный процесс с температурой очага примерно до 100°C ;

$K_p > 0,40$ – горит метан;

$K_p > 0,80$ – совместное горение метана и дерева;

$K_p > 0,90$ – горение дерева.

В случае возникновения пожара на шахте, отрабатывающей пласт угля, склонного к самовозгоранию, при определении концентраций азота N_2 и $\text{N}_2^{\text{п}}$ в формулах (2) и (3) дополнительно учитывают концентрацию водорода H_2 в отобранных пробах.

В случае возникновения пожара на шахте, отрабатывающей пласт угля, склонного к самовозгоранию, дополнительно отбирают пробы воздуха для определения температуры угля по соотношению непредельных углеводородов (этилен и ацетилен).

Проводя апробацию метода идентификации вида и количества сгорающих веществ при подземных пожарах, по формулам (1)–(3) были рассчитаны значения параметра K_p для газовых проб, отобранных во время подземных пожаров, происшедших на угольных шахтах Донбасса в 2010–2021 гг. При этом использованы данные докладных записок по ликвидации аварий подразделениями ГВГСС МЧС ДНР и выводы комиссий, в том числе экспертных комиссий по расследованию причин возникновения аварий на угольных предприятиях.

Для исследования были использованы данные НИИ «Респиратор» по склонности к самовозгоранию отрабатываемых шахтопластов, наличию водорода в аварийных пробах, отобранных при локализации и ликвидации аварий, и извещения НИИ «Респиратор» о результатах анализа проб газов на содержание этилена и ацетилена и определения температуры очага горения.

Ниже представлены данные газовой обстановки по происшедшим авариям на шахтах Донбасса и значения рассчитанного параметра K_p .

1. ОП «Шахта имени М. И. Калинина» ГП «ДУЭК», авария по роду «пожар» на выемочном участке 2-й восточной лавы ЦПУ пласта h_{10} , происшедшая 2 февраля 2012 г. в 16 ч в 25 мин (табл. 1).

Таблица 1
Данные по газовой обстановке во 2-й восточной лаве ЦПУ пласта h_{10}

Дата	Время отбора	Места отбора проб	$\text{CO}_{2\text{исх}}$	$\text{CO}_{2\text{вх}}$	CH_4	O_2	CO	H_2	K_p
02.02.12	19.15	Вентиляционный штрек 1-й восточной лавы ЦПУ	9,3	0,1	14,2	10,1	0,0058	0,0000	1,2276 горит дерево
04.02.12	12.45	Вентиляционный штрек 1-й восточной лавы ЦПУ	8,7	0,12	18,4	8,8	0,0055	0,0000	1,0448 горит дерево
09.02.12	17.45	Вентиляционный штрек 1-й восточной лавы ЦПУ (из-за перемычки № 1)	8,3	0,15	33,0	5,9	0,0047	0,0000	1,0073 горит дерево
16.02.12	10.15	Вентиляционный штрек 1-й восточной лавы ЦПУ (из-за перемычки № 1)	8,5	0,15	35,0	5,1	0,0049	0,0000	0,9800 горит дерево

Пласт h_{10} не склонен к самовозгоранию, температура очага горения по соотношению неопредельных углеводородов ввиду отсутствия водорода в отобранных газовых пробах не определялась.

Выполнив расчеты по формулам (1)–(3), получили значения параметра K_p , согласно которым сгораемое вещество – дерево.

Согласно заключению экспертной комиссии по расследованию причин пожара на выемочном участке 2-й восточной лавы ЦПУ пласта h_{10} ОП «Шахта имени М. И. Калинина» ГП «ДУЭК», происшедшего 2 февраля 2012 г. в 16 ч 25 мин; причина пожара – загорание деревянных костров в куполах обрушения кровли во 2-й восточной лаве ЦПУ пласта h_{10} . Источником зажигания древесины стало горение метана в куполах вследствие попадания в них высокотемпературных продуктов горения взрывчатых материалов при ведении взрывных работ в лаве.

2. ПАО «ДТЭК «Шахта «Комсомолец Донбасса», авария по роду «пожар» в конвейерной выработке 2-й западной лавы пласта l_7 блока № 5, происшедшая 26 января 2014 г. (табл. 2).

Таблица 2

Данные по газовой обстановке во 2-й западной лаве пласта l_7 блока № 5

Дата	Время отбора	Места отбора проб	CO _{2исх}	CO _{2вх}	CH ₄	O ₂	CO	H ₂	K_p
26.01.14	22.00	Конвейерная выработка 2-й западной лавы пласта l_7 в 10 м от сопряжения с конвейерной выработкой пласта l_7 блока № 5	0,7	0,0	1,5	19,2	0,0288	0,0000	0,4317 горит метан
26.01.14	22.30	Конвейерная выработка 2-й западной лавы пласта l_7 в 10 м от сопряжения с конвейерной выработкой пласта l_7 блока № 5	0,72	0,0	1,4	18,9	0,0487	0,0000	0,3570 горит метан
27.01.14	16.10	Конвейерная выработка 2-й западной лавы пласта l_7 в 10 м от сопряжения с конвейерной выработкой пласта l_7 блока № 5	0,92	0,0	1,9	18,8	0,0338	0,0000	0,469 горит метан
27.01.14	23.30	Конвейерная выработка 2-й западной лавы пласта l_7 в 10 м от сопряжения с конвейерной выработкой пласта l_7 блока № 5	0,97	0,0	1,7	18,8	0,0331	0,0000	0,4846 горит метан

Пласт l_7 блока № 5 не склонен к самовозгоранию, температура очага горения по соотношению непредельных углеводородов ввиду отсутствия водорода в отобранных газовых пробах не определялась.

Выполнив расчеты по формулам (1)–(3) были получены значения параметра K_p , согласно которым сгораемое вещество – метан.

Согласно материалам комиссии по расследованию причин пожара, происшедшего 26 января 2014 г. в конвейерной выработке 2-й западной лавы пласта l_7 блока № 5 ПАО «ДТЭК «Шахта «Комсомолец Донбасса», произошло воспламенение метано-воздушной смеси в трещинах кровли вентиляционного штрека 3-й западной лавы пласта l_7 блока № 5 с дальнейшим его распространением по местным скоплениям метана в конвейерную выработку 2-й западной лавы пласта l_7 блока № 5.

3. ОП «Шахта имени А. А. Скочинского» ГП «ДУЭК», авария по роду «пожар» на выемочном участке 6-й западной лавы Западной панели пласта h_6^1 , происшедшая 17 ноября 2020 г. в 05 ч 20 мин (табл. 3).

Таблица 3

Данные по газовой обстановке в 6-й западной лаве Западной панели пласта h_6^1

Дата	Время отбора	Места отбора проб	CO _{2исх}	CO _{2вх}	CH ₄	O ₂	CO	H ₂	K_p ,
17.11.20	08.15	Вентиляционный штрек 5-й западной лавы Западной панели	0,1	0,0	1,2	20,3	0,0080	0,0000	0,2110 горит уголь
17.11.20	08.45	Вентиляционный штрек 5-й западной лавы Западной панели	0,15	0,0	1,8	19,9	0,0077	0,0000	0,1857 горит уголь
31.03.22	08.50	Вентиляционный штрек 5-й западной лавы Западной панели ДистОП	4,8	0,1	13,8	13,4	0,0137	0,0000	1,0181 горит дерево
15.04.22	09.25	Вентиляционный штрек 5-й западной лавы Западной панели ДистОП	4,6	0,1	14,0	13,4	0,0140	0,0000	0,9748 горит дерево

Примечание: ДистОП – дистанционный отбор проб.

Пласт h_6^1 склонен к самовозгоранию, температуру очага горения по соотношению непредельных углеводородов определяли в сентябре-октябре 2021 г. по пробам, отобранным из-за взрывоустойчивых переемычек № 1 и 2, она составила 180 °С.

Выполнив расчеты по формулам (1)–(3), получили значения параметра K_p , согласно которым в момент начала аварии сгораемым веществом был уголь, а впоследствии, по состоянию на апрель 2022 г., в изолированном аварийном

участке 6-й западной лавы Западной панели пласта h_6^1 наблюдался процесс горения (тления) древесины.

Согласно заключению экспертной комиссии по расследованию причин пожара на выемочном участке 6-й западной лавы Западной панели пласта h_6^1 ОП «Шахта имени А. А. Скочинского» ГП «ДУЭК», происшедшего 17 ноября 2020 г. в 05 ч 20 мин, его причиной стало самовозгорание угля в выработанном пространстве с последующим воспламенением метана.

Выводы и перспективы дальнейших исследований. На основании результатов анализа газовых проб шахтного воздуха методом идентификации вида сгорающих веществ на аварийных (пожарных) участках различных шахт Донбасса были установлены реальные причины возникновения пожаров, что позволит в дальнейшем оперативно выбрать способ ликвидации пожара и необходимые технические средства.

Список литературы / References

1. Портола, В. А. Пожарная безопасность горных предприятий / В. А. Портола. – Кемерово : ГУ КузГТУ, 2008. – 158 с.

Portola V. A. *Pozharnaya bezopasnost gornyykh predpriyatiy* [Fire safety of mining enterprises]. Kemerovo, GU KuzGTU Press, 2008, 158 p. (In Russian)

2. Лобазнов, А. В. Разработка способа и средств обнаружения начальной стадии подземных пожаров : автореферат диссертации ... кандидата технических наук / А. В. Лобазнов. – М., 2011. – 23 с.

Lobaznov A. V. *Razrabotka sposoba i sredstv obnaruzheniya nachalnoy stadii podzemnykh pozharov: avtoreferat dissertatsii ... kandidata tekhnicheskikh nauk* [Development of method and means of detection of initial stage of underground fire: author's abstract of Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 2011, 23 p. (In Russian)

3. Sahay N., Sinha A., Haribabu B. [et al.]. Dealing with open fire in an underground coal mine by ventilation control techniques. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2014, vol. 114, pp. 445-453. URL: <https://www.saimm.co.za/Journal/v114n06p445.pdf>. (In English)

4. Орликова, В. П. Газовый анализ продуктов термического разложения древесины / В. П. Орликова, Д. И. Момот // Научный вестник НИИГД «Респиратор» : научно-технический журнал. – 2022. – № 2(59). – С. 64 – 72.

Orlikova V. P., Momot D. I. *Gazovyy analiz produktov termicheskogo razlozheniya drevesiny* [Gas analysis of wood thermal decomposition products]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*, 2022, no. 2(59), pp. 64-72. (In Russian)

5. Асеева, Р. М. Горение и пожарная опасность древесины / Р. М. Асеева, Б. Б. Серков, А. Б. Сивенков // Пожаровзрывоопасность веществ и материалов : научно-технический журнал. – М., 2012. – Т. 21, № 1. – С. 19 – 32.

Aseyeva R. M., Serkov B. B., Sivenkov A. B. *Goreniye i pozharnaya opasnost drevesiny* [Combustion and fire hazard of wood]. *Pozharovzryvoopasnost veshchestv i materialov : nauchno-tekhnicheskiy zhurnal*. Moscow, 2021, vol. 21, no. 1, pp. 19-32. (In Russian)

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

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

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С. П. Грековым
Дата поступления рукописи 31.01.2023
Дата опубликования 17.03.2023

*Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, head of department; e-mail: ennio_80@mail.ru;
Dmitry Ivanovich Momot, scientific associate; e-mail: dimsience@mail.ru;
Viktoria Vladimirovna Karasyova, engineer of the 1st category; e-mail: obep.niigd@list.ru
State Budgetary Establishment "The Scientific Research Institute "Respirator"
of the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence,
Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters"
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 949) 340-97-96*

TESTING OF METHOD FOR IDENTIFICATION OF COMBUSTIBLE SUBSTANCES TYPES IN UNDERGROUND FIRES

Purpose. Testing of the method for identification of types of combustible substances in underground fires on the basis of data on gas composition of a mine air in order to determine the real causes of fire.

Methods. Analytical calculation of the K_p parameter which characterizes the type of combustible substance (coal, wood, methane) based on the data analysis of gas samples taken from the mine air (incoming and return ventilation stream) in the seat of fire.

Results. Based on the data on the underground fires outbreaks in Donets basin mines the K_p parameter characterizing the combustible substance type (coal, wood, methane) and its correspondence with the real cause of fire has been determined.

Scientific novelty. The identification of types of combustible substances (coal, wood, methane) in the seat of the underground fire according to the data on the gas composition of the mine air.

Practical value. The method for identification of types of combustible substances will permit to select the technique and required technical means timely for elimination of the underground fire.

Keywords: *underground fire; coal; wood; methane; mine air; combustible substance.*

УДК [614.8:504.5]:[622.012.2:06.012.7]

Анатолий Федорович Иваненко, нач. отд.; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;

Петр Евгеньевич Мухин, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: petr63203@gmail.com

Государственное бюджетное учреждение

«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: +7 (856) 332-78-44; 332-78-49

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ПРИ ЛИКВИДАЦИИ И КОНСЕРВАЦИИ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ДНР

Цель. Разработать методический подход к оценке экологического риска возникновения чрезвычайных ситуаций при ликвидации и консервации угольных шахт для обеспечения промышленной безопасности.

Методы. Использован вероятностно-статистический метод количественной и качественной оценки экологического риска.

Результаты. Разработаны процедура и алгоритм оценки экологического риска возникновения чрезвычайных ситуаций при ликвидации и консервации угольных шахт.

Научная новизна. Впервые предложен научно обоснованный подход к качественной и количественной оценке экологического риска возникновения чрезвычайных ситуаций при ликвидации и консервации угольных шахт.

Практическая значимость. Предложенный методический подход позволяет повысить качество оценки экологического риска возникновения чрезвычайных ситуаций при ликвидации и консервации угольных шахт.

Ключевые слова: чрезвычайная ситуация; экологический риск; оценка риска; угольная шахта; ликвидация и консервация.

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. Проблемы обеспечения экологической безопасности актуальны в реализации стратегии устойчивого развития Донецкой Народной Республики.

Заккрытие значительного количества шахт обусловило возникновение целого ряда техногенных процессов, оказывающих негативное влияние на инфраструктуру региона. Поэтому возникла необходимость решения задач идентификации и прогнозирования возможных чрезвычайных ситуаций (далее – ЧС), комплексного изучения и классификации влияния экологических последствий при ликвидации и консервации угольных шахт на окружающую среду, объекты промышленно-хозяйственного комплекса и население прилегающих территорий. Актуально при решении этих задач определение вероятности возникновения техногенных ЧС и возможных последствий с дальнейшей разработкой превентивных мероприятий, то есть анализ и оценка экологического риска.

Техногенные и экологические последствия закрытия угольных шахт условно можно подразделить на: гидрохимические (загрязнение поверхностных

водоемов, подземных вод, грунтов, изменение химического состава подземных вод); гидрогеологические (при «мокрой консервации» – нарушение гидрологического режима поверхностных и подземных водных горизонтов, подтопление и заболачивание земной поверхности, увеличение водопритока в действующие шахты, слив на земную поверхность минерализованных шахтных вод; при «сухой консервации» – нарушение гидрологического режима поверхностных и подземных водных горизонтов, истощение подземных водоносных горизонтов); газохимические (выход рудничных газов на поверхность, загрязнение атмосферы продуктами горения породных отвалов, накопление рудничных газов в подземных частях зданий и сооружений); инженерно-геологические (деформация и проседание земной поверхности, деформация инженерных коммуникаций, деформация и разрушение зданий и сооружений, снижение механической прочности пород в зонах подтопления, водонасыщение массива горных пород).

Ликвидация и консервация угольных шахт вызывает необходимость обеспечить экологическую безопасность для населения региона на основе минимизации негативных последствий ЧС на окружающую среду, для чего необходимо решить следующие экспериментально-теоретические задачи:

- обосновать номенклатуру техногенных факторов, определяющих основные параметры экологических последствий ликвидации и консервации угольных шахт;
- провести ранжирование вышеуказанных факторов по степени значимости влияния на окружающую среду;
- внедрить систему постоянного мониторинга за состоянием проблемных территорий;
- разработать критерии оценки параметров негативного воздействия техногенных факторов на экологическую ситуацию в регионе.

Недостовверная оценка экологической ситуации, как правило, связана с неопределенностью перспективного прогноза вследствие несовершенства аппарата прогнозирования. Улучшению экологической ситуации в регионе в настоящее время препятствует отсутствие новых подходов к управлению экологической безопасностью. Поэтому исследования в области обеспечения экологической безопасности региона вследствие закрытия угольных шахт чрезвычайно актуальны для Донбасса.

Анализ последних исследований и публикаций. Существует значительное количество исследований, посвященных различным подходам методам анализа и оценки экологического риска возникновения чрезвычайных ситуаций при ликвидации и консервации угольных шахт. В опубликованных научных работах на основании исследований геоэкологических и геомеханических процессов при подземной разработке угольных пластов разработаны методы прогноза опасных явлений, которые могут возникнуть при затоплении выработанного пространства шахт при их «мокрой консервации» [1]. Рассмотрены также

вопросы деградации земель сельскохозяйственного назначения и вредного влияния на объекты и сооружения в пределах горных отводов закрытых шахт, обеспечения экогидробезопасности, защиты территорий от выделения шахтных газов [2]. Однако специфика проявления негативных экологических последствий требует дальнейшего совершенствования методик оценки рисков возможных ЧС.

Цель исследования – разработать методический подход к оценке экологического риска возникновения чрезвычайных ситуаций при ликвидации и консервации угольных шахт для обеспечения экологической безопасности.

Материалы и результаты исследований. Экологический риск – это количественная или качественная оценка экологической опасности неблагоприятных воздействий на окружающую среду и население.

Для количественной оценки экологического риска необходимо определить факторы экологической опасности, методы оценки ущерба от их проявления.

Опасности в общем случае можно разделить на параметрические, которые измеряют специальными приборами, и стохастические, оцениваемые экспертами [3].

В зависимости от вида факторов экологической опасности существуют разные способы оценки ущерба: измерение и сравнение результатов с нормативами; расчеты на основе статистических данных с применением методов теории вероятностей; моделирование сценариев развития ЧС, экспертные оценки.

Информационной основой для анализа и оценки экологических рисков служат сведения о различных процессах и явлениях, результаты мониторинга экологической обстановки, данные оценки воздействия на окружающую среду, экологической экспертизы и аудита, экологической и санитарно-гигиенической паспортизации, государственного учета и регистрации.

Для анализа и оценки экологического риска могут быть использованы:

- статистические методы оценки, которые предполагают обработку статистических данных методами математической статистики и применяются преимущественно в случаях, когда имеются достоверные сведения за продолжительный период времени;

- прогнозные оценки с использованием математических моделей. Моделирование предоставляет возможность рассмотреть различные варианты развития ЧС и дать прогноз экологической ситуации в случае их возникновения. Оптимальный модельный комплекс при разработке экологического прогноза содержит: 1) модели объектов горного массива, атмосферы и гидросферы в пределах региона; 2) модели техногенных процессов и явлений геомеханической и гидрогеологической направленности; 3) алгоритмы, описывающие методику измерений и обработки материалов наблюдений; 4) оценки эколого-экономической эффективности применяемых мероприятий;

- экспертные оценки, которые, как правило, используются при отсутствии статистических данных или при рассмотрении рисков, не имеющих аналогов.

Для получения научно обоснованных количественных и качественных оценок вероятности и экономических последствий наступления экологически неблагоприятных событий предлагается следующий методический подход.

При количественной оценке экологический риск может быть определен как произведение вероятности возникновения ЧС на ожидаемый ущерб за определенный период. Если в течение рассматриваемого периода может произойти несколько ЧС, то показателем риска служит сумма ущербов от всех возможных ЧС

$$R = \sum_{i=1}^n p_i U_i, \quad (1)$$

где R – количественная оценка риска, выражаемая в тех же показателях, что и ущерб;

n – число возможных вариантов ущербов при наступлении ЧС, включая нулевой ущерб;

p_i – вероятность наступления ЧС;

U_i – величина ущерба, определяемая по формуле

$$U = \sum_{i=1}^n W_i C_i, \quad (2)$$

где W_i – обобщенная составляющая прогнозируемого ущерба по различным компонентам окружающей среды;

C_i – цена i -й составляющей ущерба на единицу измерения с учетом его социально-экономического значения.

Таким образом, для определения величины риска по выражению (1) необходимо иметь информацию, выражающую соответствие значений p_i и U_i , при $i = 1, 2, \dots, n$. Такая информация в простейшем случае определяет закон распределения вероятностей в пространстве ущербов. В предположении непрерывной зависимости вероятности p_i от значений ущерба u получим $p_i = P(u)$, тогда выражение (1) может быть представлено в виде интеграла

$$R = \int_{-\infty}^{\infty} u P(u) du. \quad (3)$$

В более общем случае, когда ущерб наступает вследствие различных неблагоприятных и не зависящих друг от друга ЧС, средний риск может быть определен согласно следующей формуле:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} U_i, \quad (4)$$

где p_{ij} – вероятность получения ущерба U_i при наступлении ЧС j -го типа.

Вероятность получения ущерба из формулы (4) определяют как условную вероятность по формуле

$$P_{ij} = P_j P_i(j), \quad (5)$$

где P_j – вероятность наступления ЧС j -го типа;

$P_i(j)$ – вероятность получения ущерба U_i при наступлении ЧС j -го типа.

При условии, что ущербы от различных событий измеряются по одной шкале, и с учетом формулы (5) для определения величины среднего риска вместо выражения (1) можно использовать следующую формулу:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_j P_i(j) U_i, \quad (6)$$

где P_j – выражает закон распределения вероятностей наступления ЧС;

$P_i(j)$ – выражает законы распределения ущербов при наступлении каждой из таких ЧС.

Качественную оценку экологического риска предлагается выполнять в соответствии с разработанной матрицей риска, которая показывает зависимость уровня риска от соотношения вероятности возникновения ЧС и ее последствий (ущерба) (рис. 1).

p_5	r_3	r_4	r_4	r_5	r_5
p_4	r_2	r_3	r_4	r_4	r_5
p_3	r_1	r_2	r_3	r_4	r_4
p_2	r_1	r_1	r_2	r_3	r_4
p_1	r_1	r_1	r_1	r_2	r_3
	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5

Рис. 1. Значения рисков

Разработанная пятиуровневая шкала уровня вероятности возникновения ЧС включает следующие показатели:

$$P = \{p_1, p_2, p_3, p_4, p_5\},$$

где p_1 – маловероятное событие;

p_2 – редкое событие;

p_3 – случайное событие;

p_4 – возможное событие;

p_5 – вероятное событие.

Пятиуровневая шкала последствий ЧС включает следующие показатели ущерба:

$$U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\},$$

где u_1 – минимальный ущерб;
 u_2 – умеренный ущерб;
 u_3 – существенный ущерб;
 u_4 – значительный ущерб;
 u_5 – катастрофический ущерб.

В зависимости от полученного значения оценки введены следующие категории рисков:

$$R = \{r_1, r_2, r_3, r_4, r_5\},$$

где r_1 – незначительный риск;
 r_2 – приемлемый риск;
 r_3 – допустимый риск;
 r_4 – значительный риск;
 r_5 – недопустимый риск.

В зависимости от рассчитанного значения риска определяется необходимость проведения мероприятий по предотвращению или ликвидации последствий ЧС в соответствии с таблицей.

Таблица

Мероприятия по предотвращению или ликвидации последствий
чрезвычайных ситуаций

Категория риска	Оценка	Мероприятия
Незначительный	1–3	Мероприятия не требуются
Приемлемый	4–6	Необходим контроль риска возникновения ЧС
Допустимый	7–9	Необходимо осуществить мероприятия по снижению риска ЧС. Если риск имеет серьезные последствия, необходимо более точно вычислить вероятность возникновения ЧС
Значительный	10–16	Необходимы обязательные срочные мероприятия по снижению риска ЧС
Недопустимый	17–25	Работа в условиях риска ЧС должна быть немедленно прекращена и возобновлена только после ликвидации или снижения риска до приемлемого уровня

Выводы и перспективы дальнейших исследований. Предложенный методический подход позволяет повысить качество оценки экологического риска возникновения чрезвычайной ситуации при ликвидации и консервации угольных шахт.

В условиях возможного роста числа и тяжести последствий ЧС техногенного характера вследствие дальнейшей ликвидации и консервации угольных шахт необходима разработка системы прогнозирования и предупреждения возникновения ЧС [4] для обеспечения экологической безопасности региона.

Прогнозирование ЧС должно включать в себя идентификацию источников опасности, оценку состояния сложных природно-технологических систем, к которым относятся угольные шахты, мониторинг и моделирование развития ситуации на закрываемых шахтах, а также оценку достоверности полученных результатов [3].

При создании системы прогнозирования ЧС необходимо установить критерии, позволяющие оценить и измерить степень опасности ЧС и вероятность их возникновения. Для количественного анализа степени опасности для персонала и/или населения, технических объектов и окружающей среды в качестве базовых должны приниматься критерии рисков, которые определяются вероятностью реализации ЧС и размером возможного ущерба.

В рамках дальнейшего развития исследований проблемы, рассмотренной в данной статье, предлагается усовершенствовать методические подходы для анализа техногенных процессов и повышения качества перспективного прогнозирования экологической обстановки в регионе, а также разработать программное обеспечение для своевременной и эффективной оценки процессов, сопровождающих ликвидацию и консервацию угольных шахт.

Список литературы / References

1. Решение геоэкологических и социальных проблем при эксплуатации и закрытии угольных шахт / В. Ф. Янукович, Н. Я. Азаров, А. Д. Алексеев [и др.]. – Донецк : АЛАН, 2002. – 480 с.

Yanukovich V. F., Azarov N. Ya., Alekseyev A. D. [et al.]. *Resheniye geoekologicheskikh i sotsialnykh problem pri ekspluatatsii i zakrytii ugolnykh shakht* [Solution to geo-environmental and social problems during operation and closure of coal mines]. Donetsk, ALAN Publ., 2002, 480 p. (In Russian)

2. Техногенные последствия закрытия угольных шахт Украины : монография / Ю.Н. Гавриленко, В.Н. Ермаков, Ю.Ф. Кренида [и др.] ; под ред. Ю. Н. Гавриленко, В. Н. Ермакова. – Донецк : Норд-Пресс, 2004. – 631 с.

Gavrilenko Yu. N., Yermakov V. N., Krenida Yu. F. [et al.]. Gavrilenko Yu. N., Ermakov V. N. [eds.]. *Tekhnogennyye posledstviya zakrytiya ugolnykh shakht Ukrainy : monografiya* [Technogenic consequences of closing of Ukraine's coal mines: monograph]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2004, 631 p. (In Russian)

3. Яковлев, В. В. Экологическая безопасность, оценка риска : монография / В. В. Яковлев. – СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2007. – 399 с.

Yakovlev V. V. *Ekologicheskaya bezopasnost, otsenka riska : monografiya*

[Environmental safety, risk assessment: monograph]. Saint-Petersburg, SPbGPU Press, 2007, 399 p. (In Russian)

4. Бурков В. Н. Экологическая безопасность / В. Н. Бурков, А. В. Щепкин. – М. : ИПУ РАН, 2003. – 92 с.

Burkov V. N., Shchepkin A. V. *Ekologicheskaya bezopasnost* [Environmental safety]. Moscow, IPU RAN Publ., 2003, 92 p. (In Russian)

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А. Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 03.02.2022
Дата опубликования 17.03.2022

Anatoly Fyodorovich Ivanenko, head of department; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;

Pyotr Yevgenyevich Mukhin, Cand. Tech. (Sci.), senior scientific associate; e-mail: petr63203@gmail.com

State Budgetary Establishment “The Scientific Research Institute “Respirator”

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

Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters”

238048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+7 856) 332-78-49

ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT DURING LIQUIDATION AND CONSERVATION OF COAL MINES OF THE DPR

Purpose. To develop a methodological approach to assessment of the environmental risk of emergencies occurring during liquidation and conservation of coal mines in order to ensure the industrial safety.

Methods. There has been a probabilistic and statistical method of quantitative and qualitative assessment of the environmental risk applied.

Results. The procedure and algorithm have been developed for assessing the environmental risk of emergencies occurring during liquidation and conservation of the coal mines.

Scientific novelty. For the first time ever the scientifically grounded approach to the qualitative and quantitative assessment of the environmental risk of emergencies occurring during liquidation and conservation of coal mines has been proposed.

Practical value. The proposed methodological approach permits to improve the quality of assessment of the environmental risk of emergencies occurring during liquidation and conservation of the coal mines.

Keywords: *emergency situation; environmental risk; risk assessment; coal mine; liquidation and conservation.*

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПРОВЕРКИ И ИСПЫТАНИЯ СЕТИ НАРУЖНОГО И ВНУТРЕННЕГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ УПСВ



Предназначено для проверки давления и расхода воды в сети наружного и внутреннего противопожарного водоснабжения. Устройство УПСВ стойко к воздействию внешних климатических факторов во время эксплуатации, транспортирования и хранения согласно ГОСТ 15150–69. Отличительной особенностью УПСВ по сравнению с другими аналогичными устройствами является определение расхода и давления воды по единой шкале.

Техническая характеристика

Наименование показателя	Значение
Рабочее давление, МПа	0,05–1,0
Пропускная способность, л/с	2,5–11
Габариты в частично разобранном состоянии, мм, не более	290×240×200
Масса в частично разобранном состоянии, кг, не более	4
Срок службы, лет	5

ШКАФ СУШИЛЬНЫЙ «БРИЗ»



Предназначен для сушки пожарных рукавов разных типоразмеров и боевой одежды пожарного. Выполнен в климатическом исполнении У категории размещения 3 по ГОСТ 15150–69 для эксплуатации при температуре окружающей среды от плюс 5 °С до плюс 35 °С и относительной влажности воздуха 80 %. В шкафу установлены вытяжной вентилятор, два теплоventильатора с керамическими нагревательными элементами для нагревания воздуха с системой защиты от перегрева, что обеспечивает пожарную безопасность.

Техническая характеристика

Наименование показателя	Значение
Количество одновременно высушиваемых пожарных рукавов внутренним диаметром: 51 мм; 66 мм; 71 мм, шт., не более	6; 4; 3
Количество высушиваемой боевой одежды пожарного или обуви и перчаток, комплектов, не более	2
Температура сушки латексных пожарных рукавов, °С, не более	45
Температура сушки тканевых пожарных рукавов или боевой одежды пожарного, °С, не менее	30
Общая электрическая мощность, кВт	4,01
Габаритные размеры, мм	1890×1180×750
Масса, кг	99

КОНТЕЙНЕР СПАСАТЕЛЬНЫЙ КС-1



Предназначен для доставки средств медицинского назначения при оказании помощи пострадавшим на месте происшествия и на этапе эвакуации в лечебное учреждение. Согласно таблице минимального оснащения контейнер входит в состав снаряжения отделения ГВГСС, направляемого для ликвидации различного вида аварий и спасения людей. В контейнере размещают медикаменты (в ампулах, тубах, пакетах, блистерах), перевязочные материалы, инструменты и другие средства медицинского назначения.

Техническая характеристика

Наименование показателя	Значение
Габаритные размеры, мм	460×360×140
Масса контейнера без комплекта медицинских средств, кг	6
Масса комплекта медицинских средств, кг	7
Время подготовки контейнера к эксплуатации, с, не более	30

РАНЦЕВАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ТУШЕНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ОЧАГОВ ПОЖАРА ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ УПТВ



Предназначена для тушения локальных очагов пожара тонкораспыленной водой. Принцип действия – газодинамическое распыление воды и последующее ускорение капельного потока в разгонном сопле. Высокая кинетическая энергия струи позволяет эффективно преодолевать кинетический и тепловой барьеры конвективных потоков, доставляя в очаг тонкодисперсную воду. Качество тушения достигается за счет большой площади поверхности капельной жидкости, быстрого отбора теплоты из очага пожара при минимальном объеме расходуемой воды.

Техническая характеристика

Наименование показателя	Значение
Дальность подачи воды, м, не менее	16
Объем воды или воды с добавками, дм ³ , не менее	9,8
Запас воздуха, дм ³ , не менее	2 × 400
Расход воды, дм ³ /с, не менее	0,35
Расход воздуха, подаваемый на ствол, кг/с, не более	0,013
Длительность подачи воды, с, не менее	28
Номинальное время защитного действия дыхательного аппарата при легочной вентиляции 30 дм ³ /мин, мин, не менее	12
Масса опытного образца (без воды), кг, не более	21,5

Правила оформления авторских рукописей для опубликования в журнале «Научный вестник НИИ «Респиратор»

К рассмотрению принимаются авторские рукописи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступом 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура статьи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и электронная почта;
- название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;
- реферат (от 150 до 250 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурирован и содержать следующие элементы: цель; методы; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (не менее 5 слов) на русском и английском языках;
- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации.

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи (постановка задания);
- описание методов (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Объем статьи, включая текст, таблицы, рисунки, должен быть от 7 до 10 страниц. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Рисунки (диаграммы, фотоснимки и др.) предоставляются в виде отдельных файлов общепринятых графических форматов (jpeg, bmp). Диаграммы, схемы, графики должны быть доступны для редактирования (Word, Excel, Paint, CorelDRAW, Компас-3D и др.).

Рисунки (диаграммы, фотоснимки и др.) располагают вместе с текстом в местах ссылок на них. Изображения должны быть четкими и контрастными, иметь разрешение не менее 300 dpi. Рисунки нумеруют, если их два или более. Подписи обязательны. Недопустимо включать их в сам рисунок.

Формулы выполняются в редакторе Math Type (кроме однострочных), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом и располагают по центру строки. Номер формулы указывается справа в круглых скобках. Нумеруют только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы располагаются в книжной ориентации, они должны иметь заголовки и быть пронумерованными, если их две или более. Размер таблицы не должен превышать страницу.

Список литературы (не менее 5 и не более 15 источников) приводят в порядке упоминания в тексте; обозначают цифрами в квадратных скобках. Порядок изложения элементов библиографического описания на русском языке определен требованиями ГОСТ Р 7.0.100-2018. Состав источников должен быть актуальным и содержать не менее половины современных (не старше 10 лет) статей из различных изданий. В списке литературы должно быть не более 20 % источников, автором либо соавтором которых является автор статьи. Не следует включать в список литературы нормативные документы, ГОСТы, патенты; ссылки на них должны быть даны непосредственно в тексте статьи.

Рукопись должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами.

После рецензирования редакция регистрирует авторскую рукопись и совместно с автором ведет подготовку к публикации. Перед публикацией автору представляется отредактированный сверстанный вариант рукописи для ознакомления.

Авторские рукописи, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Ответственность за содержание статьи несет автор.

Авторские рукописи, которые не соответствуют данным требованиям, не рассматриваются.

Порядок рецензирования авторских рукописей для опубликования в журнале «Научный вестник НИИ «Респиратор»

Редакция осуществляет рецензирование всех поступающих в редакцию авторских рукописей, соответствующих специализации и тематике издания, с целью их экспертной оценки.

Поступившая в редакцию рукопись научной статьи рассматривается главным редактором (заместителем главного редактора) на предмет соответствия профилю журнала. Если рукопись соответствует тематике журнала и содержит новые актуальные результаты, то ее направляют рецензентам (соответствующего профиля) для экспертной оценки.

Рецензент оценивает рукопись и дает заключение о целесообразности ее публикации.

При наличии в рецензии (рецензиях) замечаний по содержанию статьи, но при условии в целом положительных рецензий, статья отправляется автору на доработку, после чего эта статья по решению редакции может быть либо опубликована, либо направлена на повторное рецензирование.

В том случае, если рецензия содержит в целом отрицательный отзыв на статью, по решению редакции статья может быть либо снята с публикации, либо направлена автору для доработки. Доработанная статья после поступления в редакцию в обязательном порядке направляется на повторное рецензирование. Статьи, получившие две отрицательные рецензии подряд, не публикуются.

Оригиналы рецензий хранятся в редакции журнала в течение 5 лет.

Научный вестник НИИ «Респиратор»

2023, № 1(60)

На русском и английском языках

Ответственный редактор Л.В. Барзий

Технический редактор Н.Н. Грибенюк

Переводчик Л.А. Ахундова

Учредитель и издатель

*Государственное бюджетное учреждение
«Научно-исследовательский институт «Респиратор» МЧС ДНР»*

Поступившие на издание авторские рукописи проходят рецензирование

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность
за использование сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано к выходу в свет 17.03.2023.

Адрес редакции и издателя: ГБУ «НИИ «Респиратор» МЧС ДНР»,
ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+7 856) 332-78-01; 332-78-60

Объем 3,74 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 21 марта 2023 г.