



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

# НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 1(59)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2022. – № 1(59). – 112 с.

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

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

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

#### Редакционная коллегия:

|                |                                              |
|----------------|----------------------------------------------|
| д-р техн. наук | В.Г. Агеев – главный редактор                |
| д-р техн. наук | 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 НИИГД «Респиратор» (протокол № 1 от 17.02.2022).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

# **SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”**

Scientific-technical journal

No. 1(59)

Published quarterly

Founded in 1970

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2022. – No. 1(59). – 112 p.

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

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

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

#### Editorial board:

|                  |                                         |
|------------------|-----------------------------------------|
| Dr. Sci. (Tech.) | V.G. Ageyev – editor-in-chief           |
| Dr. Sci. (Tech.) | V.V. Mamayev – deputy editor-in-chief   |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.P. Grekov                             |
| Dr. Sci. (Tech.) | S.Ye. Gul'ko                            |
| 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 the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 1 from 17.02.2022).

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

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

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

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

**Мамаев В.В., Галухин Н.А.**  
Математическая модель  
газодинамических процессов  
в закачном порошковом огнетушителе  
с газовым аккумулятором

7

**Агеев В.Г., Греков С.П.,  
Орликова В.П.**  
Теоретическое исследование  
параметров адсорбции азота  
ископаемыми углями

16

**Шаповалов В.В., Шлома В.В.**  
Жидкофазный абсорбент кислорода  
на основе системы кобальт(II) –  
гистидин – аммиак

26

**Коляда А.Ю., Дикенштейн И.Ф.,  
Тимошенко Д.А.**  
Параметры тушения пожаров  
тонкораспыленной водой  
на начальной стадии развития

34

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

**Захаров Д.В., Нека С.А.,  
Добрякова Е.И.**  
Обоснование необходимого количества  
пожарно-спасательных подразделений  
и мест их дислокации

44

**Симонов А.М., Всякий А.А.,  
Мавроди А.В., Агарков Ал.В.**  
Методика расчета штатной  
численности оперативной  
и оперативно-медицинской служб  
горноспасательных подразделений

53

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

**Mamayev V.V., Galukhin N.A.**  
Mathematical model  
of gas-dynamic processes in dry powder  
rechargeable fire extinguisher  
with gas charged accumulator

**Ageyev V.G., Grekov S.P.,  
Orlikova V.P.**  
Theoretical investigation of parameters  
of nitrogen adsorption by mineral coal

**Shapovalov V.V., Shloma V.V.**  
Cobalt (II) – histidine – ammonia  
system-based liquid-phase absorbent  
of oxygen

**Kolyada A.Yu., Dikenshteyn I.F.,  
Timoshenko D.A.**  
Parameters of extinguishing the fires  
with water mist at the initial stage  
of development

***II. Safety in emergencies***

**Zakharov D.V., Neka S.A.,  
Dobryakova Ye.I.**  
Substantiation of required quantity  
of fire and rescue subdivisions  
and places of their location

**Simonov A.M., Vsyakiy A.A.,  
Mavrodi A.V., Agarkov Al.V.**  
Methodology for calculating manpower  
of operational and operational-medical  
services of mine-rescue subdivisions

**Лебедева В.В., Козлитин А.А.,  
Непочатых И.Н.**

Влияние эксплуатационных факторов  
на огнезащитную эффективность  
покрытия

62

**Lebedeva V.V., Kozlitin A.A.,  
Nepochatykh I.N.**

Influence of operational factors  
on fire-retardant effectiveness of coating

**Коляда А.Ю., Буряк Д.С.**  
Обоснование гидравлических  
параметров рукавных линий

71

**Kolyada A.Yu., Buryak D.S.**  
Substantiation of hydraulic parameters  
of fire-fighting lines

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

### ***III. Labor protection and environmental safety***

**Долженков А.Ф., Джалетова Е.К.,  
Никулина А.А.**

Оценка экологического риска  
загрязнения атмосферы  
выбросами котельных малой мощности

77

**Dolzhenkov A.F., Dzhaletova Ye.K.,  
Nikulina A.A.**

Assessment of environmental risk of  
atmosphere pollution by emissions of low-  
capacity boiler stations

**Князева Т.В., Мороз Т.О.**

Трёхмерная модель теплового  
состояния пожарного  
в условиях повышенных температур

83

**Knyazeva T.V., Moroz T.O.**

Three-dimensional model  
of firefighter's body thermal status  
in conditions of elevated temperatures

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

Влияние фракционного состава  
и высоты слоя поглотителя ХП-И  
на его сорбционную емкость

93

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

Influence of fractional composition  
and layer height of the ХП-И absorbent  
on its sorption capacity

**Медгаус В.М., Папазова О.В.,  
Попов Н.Н., Шлома В.В.**

Контроль технического состояния  
аппаратов ИВЛ для продления  
срока службы

101

**Medgaus V.M., Papazova O.V.,  
Popov N.N., Shloma V.V.**

Control of technical condition of artificial  
lung ventilation apparatuses for extension  
of their useful life

## І. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 614.845.1:001.891.573

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

*Николай Александрович Галухин, ст. науч. сотр.; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru  
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-36*

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЗАКАЧНОМ ПОРОШКОВОМ ОГНЕТУШИТЕЛЕ С ГАЗОВЫМ АККУМУЛЯТОРОМ

**Цель.** Разработка математической модели газодинамических процессов в рабочих полостях закачного порошкового огнетушителя с газовым аккумулятором для обоснования его конструктивных параметров и повышения эффективности работы.

**Методы.** Теоретические исследования процессов истечения газопорошковой смеси согласно основным законам газодинамики.

**Результаты.** Получена система дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающая газодинамические процессы, для определения численными методами конструктивных и газодинамических параметров.

**Научная новизна.** Установлено отличие в характере протекания газодинамических процессов в полости газового аккумулятора и газопорошковой полости огнетушителя. Показано, что газодинамический процесс в газовом аккумуляторе – адиабатический, а в газопорошковой полости огнетушителя – изотермический. Получена система дифференциальных и алгебраических уравнений, которая учитывает отличие в протекании газодинамических процессов, предложен итерационный алгоритм ее решения.

**Практическая значимость.** Результаты исследования позволяют установить влияние конструктивных параметров закачного порошкового огнетушителя с газовым аккумулятором на процесс истечения газопорошковой струи и обосновать выбор его оптимальной конструкции.

**Ключевые слова:** *закачной порошковый огнетушитель; газопорошковая струя; газовый аккумулятор; газодинамические процессы; математическая модель.*

**Постановка проблемы.** Закачной порошковый огнетушитель – одно из основных и эффективных устройств, получивших широкое применение в практике пожаротушения. Главные достоинства закачных порошковых огнетушителей – повышенная огнетушащая способность, широкая область применения (универсальность), высокая оперативная готовность, способность работать при отрицательной температуре. Практическая реализация указанных достоинств основывается на выборе оптимальных конструктивных параметров порошковых огнетушителей. Поэтому разработка математической модели рабочих процессов в закачном порошковом огнетушителе с газовым аккумулятором позволит установить связь между конструктивными и газодинамическими параметрами, определить оптимальные конструктивные

параметры, повысить эффективность тушения пожаров с помощью порошковых огнетушителей.

**Анализ последних исследований.** Математическая модель газодинамического процесса истечения двухфазной газопорошковой смеси с постоянным отставанием частиц рассмотрена в работе [1]. Численное моделирование уравнений изотермического процесса движения газопорошковой смеси показало высокую сходимость результатов с расчетами, выполненными с использованием подхода, основанного на аналогии течения псевдоожигенного порошка и капельной жидкости.

Проведены экспериментальные исследования параметров работы техники порошкового пожаротушения на основе осциллограмм давления в корпусе огнетушителя. Приведены зависимости изменения концентрации газопорошковой смеси при различном давлении, закономерности изменения давления и расхода при работе огнетушителя [2].

Получено численное значение коэффициента расхода газопорошкового потока через выходное сопло огнетушителя на основе гипотезы об аналогии течений капельной жидкости и газопорошковой смеси при условии изотермического характера протекания газодинамического процесса в корпусе огнетушителя [3].

Выполнены исследования, позволяющие повысить эффективность аэрирования порошка и, как следствие, уменьшить остаток порошка в корпусе огнетушителя с газовым аккумулятором. Недостаток работы состоит в необоснованном применении формулы, связывающей параметры газа при адиабатическом протекании процессов в корпусе огнетушителя и в газовой полости аккумулятора; не доказано, что термодинамический процесс в газопорошковой полости огнетушителя – адиабатический [4].

**Цель исследования** – разработка математической модели газодинамических процессов при истечении газопорошковой смеси в закачном порошковом огнетушителе с газовым аккумулятором.

**Результаты исследования.** Конструктивная схема закачного порошкового огнетушителя с газовым аккумулятором с открытым пусковым клапаном показана на рис. 1.

При срабатывании пускового клапана давление внутри корпуса начинает снижаться, а сжатый газ при истечении из сопла увлекает за собой частицы порошка, образуя на выходе струю газопорошковой смеси. В первоначальном режиме работа порошкового огнетушителя с газовым аккумулятором эквивалентна работе порошкового огнетушителя без газового аккумулятора. При дальнейшем снижении давления в корпусе открываются обратные клапаны, и сжатый газ из внутренней полости газового аккумулятора, проходя через щели, аэрирует слой порошка.

После аэрирования порошок с равномерной концентрацией по всему объему корпуса выбрасывается через сопло в атмосферу.

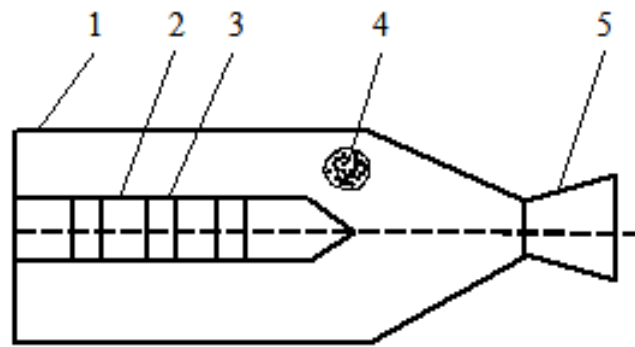


Рис. 1. Конструктивная схема закачного порошкового огнетушителя с газовым аккумулятором с открытым пусковым клапаном:

1 – корпус; 2 – газовый аккумулятор; 3 – обратный клапан; 4 – порошок; 5 – сопло

Особенность работы закачного порошкового огнетушителя заключается в образовании в корпусе огнетушителя газопорошковой смеси с большой массой порошка и большой теплопередающей поверхностью между газом и частицами порошка. Расчеты показывают, что при порозности, равной 0,5, масса порошка в 60...90 раз превосходит массу газа, а удельная поверхность частиц порошка составляет 200...400 м<sup>2</sup>/кг. За счет превосходства в массе частицы порошка удерживают температуру газа примерно на одинаковом уровне, а большая удельная поверхность частиц порошка обеспечивает быстрое выравнивание температур газа и порошка. Таким образом, порошок представляет собой термостат, обеспечивающий протекание изотермического процесса в корпусе огнетушителя.

Газовая полость аккумулятора не содержит порошок, площадь контакта газа с внутренней поверхностью аккумулятора ограничена. Вышеперечисленные факторы наряду с кратковременностью работы порошкового огнетушителя позволяют считать процесс истечения газа из аккумулятора адиабатическим (без теплообмена с внешней средой). Поэтому при математическом описании газодинамических процессов в закачном порошковом огнетушителе с газовым аккумулятором необходимо учесть, что термодинамические процессы газа внутри корпуса огнетушителя происходят по изотермическому процессу, а внутри газового аккумулятора – по адиабатическому. Задача разработки математической модели для закачного порошкового огнетушителя с газовым аккумулятором в такой постановке решается впервые.

Газовая полость аккумулятора представляет собой опорожняющуюся полость постоянного объема, закономерность изменения состояния газа в которой описывается уравнением адиабаты в дифференциальной форме

$$\frac{dP_1}{d\tau} = -\frac{k}{V_1} RT_1 G_1, \quad (1)$$

где  $P_1$  – давление в полости аккумулятора, Па;

$\tau$  – время, с;

$k$  – показатель адиабаты газа;

$V_1$  – объем полости аккумулятора, м<sup>3</sup>;

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

$T_1$  – температура газа в полости аккумулятора, К;

$G_1$  – массовый расход истекающего газа, кг/с.

Уравнение, связывающее объемы полостей в огнетушителе, запишем следующим образом:

$$V_k = V_a + V_2 + V_p, \quad (2)$$

где  $V_k$  – объем огнетушителя, м<sup>3</sup>;

$V_a$  – объем аккумулятора, м<sup>3</sup>;

$V_2$  – объем газа в корпусе огнетушителя, м<sup>3</sup>;

$V_p$  – объем порошка в корпусе огнетушителя, м<sup>3</sup>.

Закон сохранения массы газа в единицу времени запишем в виде

$$G_1 = G_2 + G_r, \quad (3)$$

где  $G_2$  – массовый расход газа на заполнение корпуса огнетушителя, кг/с;

$G_r$  – массовый расход вытекающего из газопорошковой смеси газа, кг/с.

Газовую полость в корпусе огнетушителя можно представить в виде проточной полости с переменным газовым объемом, в которую газ поступает из аккумулятора и частично выносится в атмосферу вместе с газопорошковой смесью через сопло. Уравнение состояния газа в корпусе огнетушителя в дифференциальной форме (с учетом изотермичности процесса  $T_2 = const$ ) имеет вид

$$P_2 \frac{dV_2}{d\tau} + V_2 \frac{dP_2}{d\tau} = RT_2 G_2, \quad (4)$$

где  $P_2$  – давление в корпусе огнетушителя, Па;

$T_2$  – температура газа в корпусе огнетушителя, К.

Очевидно, что работа расширения поступающего из аккумулятора газа за время  $d\tau$  затрачивается на расширение газа внутри корпуса огнетушителя и частично выносится с потоком газопорошковой смеси, то есть имеет место уравнение

$$RT_1 G_1 d\tau = RT_2 G_2 d\tau + RT_2 G_r d\tau.$$

Из этого уравнения находим, что  $RT_2 G_2 = RT_1 G_1 - RT_2 G_r$ .

Подставляя найденное выражение для  $RT_2 G_2$  в правую часть уравнения (4) и с учетом того, что  $V_2 = V_k - V_a - V_n$ , получаем дифференциальное уравнение проточной газовой полости переменного объема порошкового огнетушителя

$$\frac{dP_2}{d\tau} = \frac{1}{V_k - V_a - V_n} \left( RT_1 G_1 - RT_2 G_T + P_2 \frac{dV_n}{d\tau} \right). \quad (5)$$

Изменение температуры  $T_1$  в газовой полости аккумулятора подчиняется уравнению состояния газа в дифференциальной форме

$$\frac{dT_1}{d\tau} = \frac{T_1}{P_1} \left( \frac{dP_1}{d\tau} - T_1 \frac{R}{V_1} G_1 \right). \quad (6)$$

Уравнение истечения газа из полости аккумулятора в корпус огнетушителя (уравнение Сен-Венана – Ванцеля) имеет следующий вид:

$$G_1 = \mu_1 f_1 K \varphi(\sigma) R_1 \sqrt{RT_1}, \quad (7)$$

где  $\mu_1$  – коэффициент расхода;

$f_1$  – суммарная площадь расходных щелей, м<sup>2</sup>;

$K = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}$  – коэффициент;

$\varphi(\sigma)$  – функция расхода;

$$\varphi(\sigma) = \begin{cases} 0,258, & \text{при } 0 < \sigma \leq 0,528; \\ \sqrt{\sigma^{2/k} - \sigma^{(k+1)/k}}, & \text{при } 0,528 < \sigma \leq 1; \end{cases}$$

$$\sigma = P_2/P_1.$$

Используя аналогию между капельной жидкостью и псевдоожиженным порошком, находим массовый расход газопорошковой смеси через сопло огнетушителя

$$G_T + G_n = \mu_2 f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho_2}} \sqrt{P_2 - P_a}, \quad (8)$$

где  $G_n$  – массовый расход порошка, кг/м<sup>3</sup>;

$\mu_2$  – коэффициент расхода сопла;

$f_2$  – площадь сечения сопла, м<sup>2</sup>;

$\rho_2 = \frac{m_2 + m_n}{V_2 + V_n}$  – эффективная плотность газопорошковой смеси, кг/м<sup>3</sup>;

$m_2$  – масса газа в корпусе огнетушителя, кг;

$m_n$  – масса порошка в корпусе огнетушителя, кг;

$P_a$  – атмосферное давление, Па.

Дифференцируя уравнение (2), получаем

$$\frac{dV_2}{d\tau} = -\frac{dV_{\Pi}}{d\tau} = \frac{1}{\rho_{\Pi}} G_{\Pi}, \quad (9)$$

где  $\rho_{\Pi}$  – насыпная плотность порошка, кг/м<sup>3</sup>.

Массу газа в полости огнетушителя определим по формуле

$$m_2 = m_{0,2} + \int_0^{\tau} G_2 d\tau, \quad (10)$$

где  $m_{0,2}$  – начальная масса газа в корпусе огнетушителя, кг.

Объединяя уравнения (1), (3), (5) – (10), получаем систему уравнений

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1}{d\tau} = -\frac{k}{V_1} RT_1 G_1; \\ \frac{dP_2}{d\tau} = \frac{1}{V_K - V_a - V_{\Pi}} \left( RT_1 G_1 - RT_2 G_{\Gamma} + P_2 \frac{dV_{\Pi}}{d\tau} \right); \\ G_1 = G_2 + G_{\Gamma}; \\ G_{\Gamma} + G_{\Pi} = \mu_2 f_2 \sqrt{\frac{2}{\rho_3}} \sqrt{P_2 - P_a}; \\ \rho_3 = \frac{m_2 + m_{\Pi}}{V_2 + V_{\Pi}} = \frac{m_2 + \rho_{\Pi} V_{\Pi}}{V_K - V_a}; \\ m_2 = m_{0,2} + \int_0^{\tau} G_2 d\tau; \\ \frac{dV_{\Pi}}{d\tau} = -\frac{1}{\rho_{\Pi}} G_{\Pi}; \\ G_1 = \mu_1 f_1 K \Phi(\sigma) P_1 \sqrt{RT_1}; \\ K = \sqrt{\frac{2k}{k-1}}; \quad \sigma = P_2 / P_1; \\ \Phi(\sigma) = \begin{cases} 0,258, & \text{при } 0 < \sigma \leq 0,528; \\ \sqrt{\sigma^{2/k} - \sigma^{(k+1)/k}}, & \text{при } 0,528 < \sigma \leq 1; \end{cases} \\ \frac{dT_1}{d\tau} = \frac{T_1}{P_1} \left( \frac{dP_1}{d\tau} - T_1 \frac{R}{V_1} G_1 \right). \end{array} \right. \quad (11)$$

Для нахождения неизвестных функций в системе уравнений (11) –  $P_1, P_2, T_1, V_{\Pi}, G_1, G_2, G_{\Pi}, G_{\Gamma}, m_2, \rho_3$  – недостает одного замыкающего уравнения. Аналогичная проблема возникает и при исследовании динамических явлений в порошковом огнетушителе без газового аккумулятора [1, 3]. Для решения системы уравнений (11) вводим уравнение для определения объемной концентрации порошка  $\sigma_K$  в корпусе огнетушителя

$$\sigma_k = \frac{V_{\Pi}}{V_2 + V_{\Pi}}. \quad (12)$$

На основании формулы (2) уравнение (12) можно переписать в виде

$$\sigma_k = \frac{V_{\Pi}}{V_k + V_a}. \quad (13)$$

Систему уравнений (11) с учетом интервально заданной функции  $\varphi(\sigma)$  и выражений (12) и (13) для  $\sigma_k$  решают итерационным методом. На первой итерации (на некотором малом интервале времени, например  $\Delta\tau = 0,01$  с) по известному начальному объему порошка

$$V_{\Pi,0} = m_{\Pi,0}/\rho_{\Pi},$$

где  $m_{\Pi,0}$  – начальная масса порошка, кг.

По формуле (13) находим значение  $\sigma_{k,1}$  на первой итерации расчетов.

Зная  $\sigma_{k,1}$ , находим связь между  $V_2$  и  $V_{\Pi}$  по формуле (12), то есть получаем уравнение

$$V_2 = V_{\Pi} \left( \frac{1}{\sigma_{k,1}} - 1 \right). \quad (14)$$

Это уравнение используем для решения системы (11) на первой итерации вычислений. Получив результат, находим значения всех искомых функций, в том числе массовый расход порошка  $G_{\Pi,1}$  на интервале времени от 0 до  $\Delta\tau = 0,01$  с. По  $G_{\Pi,1}$  определяем новый объем порошка в полости огнетушителя по формуле

$$V_{\Pi,2} = \frac{m_{\Pi,0} - 0,5G_{\Pi,1} \cdot \Delta\tau}{\rho_{\Pi}}$$

и новое значение объемной концентрации порошка

$$\sigma_{k,2} = \frac{V_{\Pi,2}}{V_0 - V_a},$$

по которой уточняем связь между  $V_2$  и  $V_{\Pi}$  на второй итерации расчета

$$V_2 = V_{\Pi} \left( \frac{1}{\sigma_{k,2}} - 1 \right).$$

Далее итерации продолжаются до выполнения условия, при котором в корпусе огнетушителя остается некоторая неизвлекаемая масса порошка  $m_{\text{ост}}$ , то есть до выполнения неравенства

$$m_{п,0} - 0,5m_{п,0} \left[ G_{п,1} + \sum_{i=2}^n (G_{п,i-1} + G_{п,i}) \right] \leq m_{ост},$$

где  $n$  – количество итераций.

**Выводы.** Получена система дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающая газодинамические процессы в закачном порошковом огнетушителе с газовым аккумулятором с учетом адиабатического характера протекания газового процесса в аккумуляторе и изотермического – в газопорошковой полости огнетушителя. Использование предложенной системы уравнений для численного моделирования газодинамических процессов позволяет установить связь между конструктивными и газодинамическими параметрами, найти их оптимальные значения и повысить эффективность работы порошкового огнетушителя с газовым аккумулятором.

#### Список литературы / References

1. Кулявцев, Е.Я. Моделирование газодинамических процессов при срабатывании модуля порошкового пожаротушения с использованием аналогии капельная жидкость – псевдожидкость / Е.Я. Кулявцев, В.Г. Казанцев, Р.И. Куимов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной пром-сти. – 2013. – № 1. – С. 74 – 83.

Kulyavtsev E.Ya., Kazantsev V.G., Kuimov R.I. *Modelirovanie gazodinamicheskikh protsessov pri sbratyvaniy modulya poroshkovogo pozharotusheniya s ispol'zovaniem analogii kapel'naya zhidkost' – psevdozhidkost'* [Modeling of gas-dynamic processes during triggering the dry-powder fire-extinguishing module applying mobile liquid – pseudoliquid analogy]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti – Industrial Safety (Bulletin of the Scientific center on safety of works in coal-mining industry)*, 2013, no. 1, pp. 74-83. (In Russian).

2. Огнетушители закачного типа / Н.В. Навценя, Н.В. Исавнин, В.И. Терин, В.М. Савин // Проблемы развития пожарной техники: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1986. – С. 86 – 90.

Navtsenya N.V., Isavnin N.V., Terin V.I., Savin V.M. *Ognetushiteli zakachnogo tipa* [Fire extinguishers, rechargeable type]. *Problemy razvitiya pozharnoi tekhniki: sb. nauch. tr.* [Problems of development of fire-fighting equipment: collection of scientific papers]. Moscow, VNIPO Publ., 1986, pp. 86-90. (In Russian).

3. Казанцев, В.Г. Моделирование двухфазного истечения газопорошковой смеси через короткие сопла с учетом высокого содержания твердых частиц в газовой фазе / В.Г. Казанцев, А.Г. Овчаренко, Е.Я. Кулявцев и [др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной пром-сти. – 2015. – № 1. – С. 31 – 35.

Kazantsev V.G., Ovcharenko A.G., Kulyavtsev E.Ya. [et al.]. *Modelirovanie dvukhfaznogo istecheniya gazoporoshkovoi smesi cherez korotkie sopla s uchyotom vysokogo soderzhaniya tverdykh chastits v gazovoi faze* [Modeling of two-phase gas-

powder mixture discharge through short nozzles factoring in high density of solid particles in gas phase]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noi promyshlennosti – Industrial Safety (Bulletin of the Scientific center on safety of works in coal-mining industry)*, 2015, no. 1, pp. 31-35. (In Russian).

4. Мамаев, В.В. Параметры газоаккумулятора автоматического порошкового огнетушителя / В.В. Мамаев, И.Ф. Дикенштейн, А.А. Пилипенко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2012. – Вып. 49. – С. 90 – 98.

Mamayev V.V., Dikenshteyn I.F., Pilipenko A.A. *Parametry gazoakkumulyatora avtomaticheskogo poroshkovogo ognetushitelya* [Parameters of gas charged accumulator of automatic dry powder fire extinguisher]. *Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Mine-rescue work: collection of scientific papers / The NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2012, issue 49, pp. 90-98. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым  
Дата поступления рукописи 07.12.2021

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

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

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

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

*Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*

*283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-36*

## MATHEMATICAL MODEL OF GAS-DYNAMIC PROCESSES IN DRY POWDER RECHARGEABLE FIRE EXTINGUISHER WITH GAS CHARGED ACCUMULATOR

**Purpose.** Development of the mathematical model of the gas-dynamic processes in the working chambers of the dry powder rechargeable fire extinguisher with gas charged accumulator for substantiation of its construction parameters and for improvement of operational effectiveness.

**Methods.** Theoretical investigations of the gas-powder mixture discharge processes according to the principal laws of gasdynamics.

**Results.** The system of the differential and algebraic equations describing the gas-dynamic processes has been derived for determination of the construction and gas-dynamic parameters by the numerical methods.

**Scientific novelty.** The difference in behavior of the gas-dynamic processes in the gas charged accumulator chamber and in the gas-powder chamber of the fire extinguisher has been established. It has been demonstrated that the gas-dynamic process in the gas charged accumulator is adiabatic and the one in the gas-powder chamber of the fire extinguisher is isothermic. The system of the differential and algebraic equations has been derived factoring in the difference in behavior of the gas-dynamic processes; the iteration algorithm of its solution has been proposed.

**Practical value.** The results of the investigation make it possible to establish the influence of the construction parameters of the dry powder rechargeable fire extinguisher with gas charged accumulator on the process of the gas-powder jet discharge and to substantiate the choice of its optimal construction.

**Keywords:** *rechargeable dry powder fire extinguisher; gas-powder jet; gas accumulator; gas-dynamic processes; mathematical model.*

**УДК 622.822.22:001.891.572**

*Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, директор; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;  
Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.ru;  
Виктория Петровна Орликова, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: orlikova.69@yandex.ua  
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-79-07*

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ АДСОРБЦИИ АЗОТА ИСКОПАЕМЫМИ УГЛЯМИ**

**Цель.** Определить параметры, характеризующие процесс адсорбции азота ископаемыми углями из двухкомпонентной газовой смеси, для дальнейшего изучения процесса самонагрева твердого топлива.

**Методы.** Математическое моделирование поглощения азота на основе экспериментально полученных изотерм адсорбции исследуемого газа и феноменологический метод установления параметров этого процесса.

**Результаты.** Предложен метод определения относительной концентрации азота, адсорбированного на твердой поверхности частиц угля средней стадии метаморфизма. Получены коэффициенты адсорбции азота, находящегося в смеси с воздухом, и установлена динамика этого коэффициента за время основного поглощения газа.

**Научная новизна.** Впервые получены численные значения коэффициентов адсорбции азота, что позволит оценить влияние воздуха на процесс окисления и самонагрева угля.

**Практическая значимость.** Установленные величины коэффициентов адсорбции азота будут использованы совместно с параметрами адсорбции кислорода при изучении низкотемпературного окисления угля, что повысит достоверность прогноза эндогенной пожароопасности.

**Ключевые слова:** *низкотемпературное окисление; адсорбция кислорода; диффузия; азот; уголь; математическое моделирование.*

**Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями.** В процессе добычи угля раздробленное полезное ископаемое попадает в воздушную среду, частично дегазируется от метана и адсорбирует газообразную смесь, в которой пребывает. Адсорбтивом служит омывающая уголь смесь азота, кислорода и метана, причем кислород вступает в реакцию с адсорбентом, что приводит к выделению теплоты и нагреванию угля.

Адсорбционная способность газов различна, поэтому еще в 1879 году Смит классифицировал различные газы по их адсорбируемости, приняв за единицу этой величины поглощение водорода. Было установлено, что объемы газов, поглощаемые углем, пропорциональны следующим числам:  $H_2 = 1$ ;  $N_2 = 4,25$ ;  $CO = 6,03$ ;  $O_2 = 7,99$ ;  $CH_4 = 10,01$ ;  $CO_2 = 22,05$  [1]. Таким образом, учитывая избирательность адсорбции, уголь поглощает кислород примерно в два раза лучше, чем азот, тем не менее последний также участвует в этом процессе, занимая реакционную поверхность и являясь конкурентом кислорода. Поэтому, изучая процесс низкотемпературного окисления угля, необходимо оценить коэффициенты адсорбции и кислорода, и азота.

Исследованиями поглощения углем азота в разное время занимались советские ученые В.В. Ходот, И.Л. Эттингер, М.Б. Сулла, М.В. Яновская, Л.С. Лейбензон и другие. Например, в работах Л.С. Лейбензона описана полная обратимость точек сорбционного равновесия при поглощении азота, что свидетельствует о существовании физической ван-дер-ваальсовой сорбции. Исследования азотоемкости углей Кузбасса, выполненные И.Л. Эттингером, показали линейность изотерм адсорбции и соответствие уравнению Фрейндлиха, так как в области малых заполнений и слабосорбирующего газа сорбция протекает на однородных участках поверхности. Однако это уравнение непригодно в рассматриваемом случае, так как выведено для вакуумированных углей. Как известно, важная константа, определяющая сорбционную способность различных газов, – температура их сжижения, значение которой у азота – одно из минимальных. Вследствие этого уголь слабо поглощает азот, который в большом количестве находится в шахтном воздухе [2].

Исследования И.Л. Эттингера и М.Б. Суллы позволили установить зависимость количества поглощенного азота от выхода летучих веществ угля и его фракционного состава с размерами частиц от 0..3 до 13...25 мм. В результате статистической обработки результатов (рис. 1) получены следующие зависимости:

- для углей фракции 0...3 мм

$$Q'_{N_2} = 1,2519 - 0,0123V^{daf};$$

- для углей фракции 13...25 мм

$$Q''_{N_2} = 1,1754 - 0,0104V^{daf},$$

где  $Q'_{N_2}$  и  $Q''_{N_2}$  – количество поглощенного углем азота из газовой смеси (50 %  $N_2$  + 50 % воздуха) при давлении 800 мм рт. ст., см<sup>3</sup>/г;

$V^{daf}$  – выход летучих веществ угля, %.

Исследованиями установлено, что при одинаковом давлении поглощение углем азота из газовой смеси меньше, чем при использовании чистого газа, хотя разница не столь велика, как для диоксида углерода. В то же время в отдельных экспериментах зафиксировано существенное различие между этими показателями, которое можно объяснить остаточным содержанием газов в сорбируемых углях.

Сорбционные емкости углей Донбасса в двух- и трехкомпонентных газовых средах изучали Р.М. Кривицкая и М.Б. Сулла с соавторами. Результаты исследований показали увеличение сорбционной емкости углей по отношению к наиболее активному газу при изменении его парциального давления в диапазоне 1...2 атм по зависимости, близкой к линейной. Авторы пришли к выводу, что в случае двух- и многокомпонентных газовых смесей адсорбция любого компонента зависит от совокупности следующих факторов:

- парциального давления компонента в смеси;
- значения сорбционного потенциала газа;
- суммарного давления в газовой смеси;
- активности других составляющих газовой смеси.

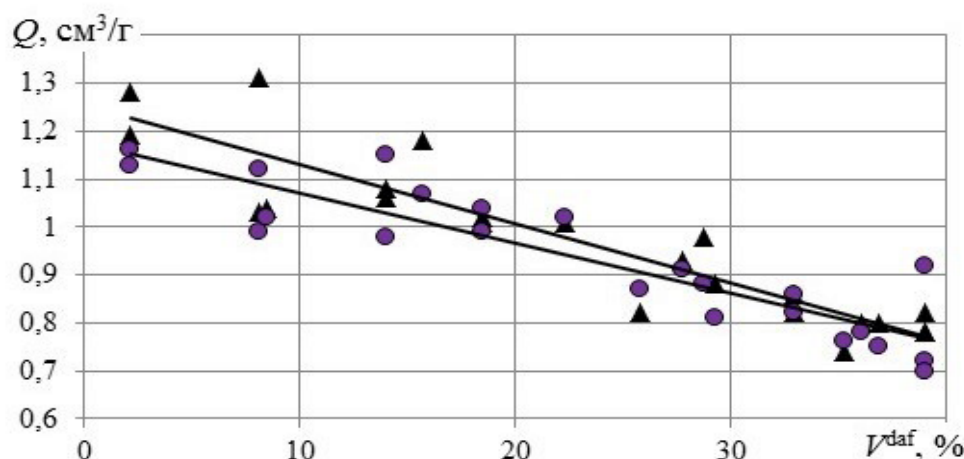


Рис. 1. Зависимость количества поглощенного азота от выхода летучих веществ угля для размеров частиц:

▲ – 0...3 мм; ● – 13...25 мм

При изучении низкотемпературного окисления угля, приводящего при ограниченном отводе теплоты к самовозгоранию, особое значение имеет кинетика процесса, так как от скорости поглощения кислорода воздуха зависит и скорость выделения теплоты. Учитывая тот факт, что в шахтном воздухе, поступающем в горные выработки, кислорода содержится в 3,7 раза меньше, чем азота, необходимо оценить влияние последнего на процесс окисления угля.

Таким образом, **цель работы** – определить параметры, характеризующие процесс адсорбции азота ископаемыми углями из двухкомпонентной газовой смеси, для дальнейшего изучения процесса самонагрева твердого топлива.

**Результаты исследований.** Воспользуемся экспериментальными данными, полученными при исследовании поглощения углями азота из газовой смеси, и с помощью математического моделирования оценим параметры адсорбции этого газа.

Для математического моделирования процесса адсорбции азота частицами ископаемого угля рассмотрим предложенную ранее модель, в которой пористая сферическая частица находится в потоке поглощаемого газа (адсорбтива) [3, 4]. Решение этой задачи имеет следующий вид [5, 6]:

$$\bar{a}_i(\rho, Fo_g) = 1 - \exp(-Ka_i) - \left[ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} B_k \mu_k \sum_{n=1}^2 \frac{Ka_i \{ \exp(p_{kn} Fo_g) - \exp(-Ka_i Fo_g) \}}{\mu_{kn} p_{kn} (Ka_i + p_{kn})} \right] \times \exp(-1,34 \cdot 10^{-2} x) \times \left[ \frac{1}{p_{kn}} \{ 1 - \exp(-p_{kn} Fo_g) \} - \frac{1}{z + p_{kn}} \{ 1 - \exp[-Fo_g (z + p_{kn})] \} \right], \quad (1)$$

где  $\bar{a}_i$  – относительная концентрация газа в неподвижной фазе твердых частиц, равная

$$\bar{a}_i = \frac{a_i}{\gamma C}; \quad (2)$$

$a_i$  – концентрация адсорбата в неподвижной фазе, моль /м<sup>3</sup>;

$\gamma$  – константа Генри;

$C$  – концентрация адсорбата в газовой фазе пор угля, моль /м<sup>3</sup>;

$B_k$  – постоянные коэффициенты, определяемые из соотношения

$$B_k = \frac{6\text{Bi}_g^2}{\mu_k^2 (\mu_k^2 + \text{Bi}_g^2 - \text{Bi}_g)};$$

$\mu_k$  – корень уравнения  $\text{tg} \mu = -\mu / (\text{Bi}_g - 1)$ ;

$p_{kn}$  – корни уравнения

$$-\mu_k^2 = p \left( 1 + \sum_{i=1}^l \frac{\gamma \text{Ka}_i}{(p_{kn} + \text{Ka}_i)^2} \right);$$

$$\mu'_{kn} = -\frac{1}{2\mu_k} \left[ 1 + \sum_{i=1}^l \frac{\gamma \text{Ka}_i^2}{(p_{kn} + \text{Ka}_i)^2} \right];$$

$\text{Ka}_i$ ,  $\rho$ ,  $\text{Fo}_g$ ,  $\text{Bi}_g$  – безразмерные параметры, равные

$$\text{Ka}_i = \frac{\beta_1 R_1^2}{D}; \quad \rho = \frac{r}{R_1}; \quad \text{Fo}_g = \frac{D\tau}{R_1^2}; \quad \text{Bi}_g = \frac{\beta R_1}{D};$$

$\beta_1$  – коэффициент адсорбции, с<sup>-1</sup>;

$\beta$  – коэффициент массообмена, м/с;

$r$  – радиальная координата, м;

$R_1$  – радиус частицы угля, м;

$D$  – коэффициент внутренней диффузии адсорбтива, м<sup>2</sup>/с;

$\tau$  – время, с;

$z$  – комплексный параметр, равный

$$z = \frac{0,76}{0,83 + Q_0 \rho_y} \left( \frac{u}{x_1} + \frac{D_1}{x_1^2} \right) \frac{R_1^2}{D};$$

$Q_0$  – газоносность пласта, м<sup>3</sup>/т;

$\rho_y$  – плотность угля, т/м<sup>3</sup>;

$x_1$  – расстояние по размеру скопления угля от места поступления в него воздуха, м;

$D_1$  – коэффициент диффузии адсорбтива в межкусковом пространстве угля, м<sup>2</sup>/с;

$u$  – скорость газового потока, м/с.

В соответствии с условиями проведения эксперимента частицы угля размером 0...3 мм помещали в поток адсорбтива – газовой смеси, содержащей 50 % азота и 50 % воздуха. Несмотря на двухкомпонентную газовую смесь, считаем, что в процессе адсорбции участвовал только азот, так как его концентрация достигает почти 90 %. Правильность наших утверждений следует из полуэмпирического соотношения Льюиса, согласно которому при постоянном общем давлении адсорбция одного компонента линейно зависит от адсорбции другого [2]. Поэтому, учитывая концентрации двух газов в смеси, принимаем, что вклад адсорбции азота является определяющим.

Экспериментальные данные кинетики поглощения азота углем с  $V^{\text{daf}} = 15,68 \%$ , полученные М.Б. Суллой и его коллегами, представлены на рис. 2.

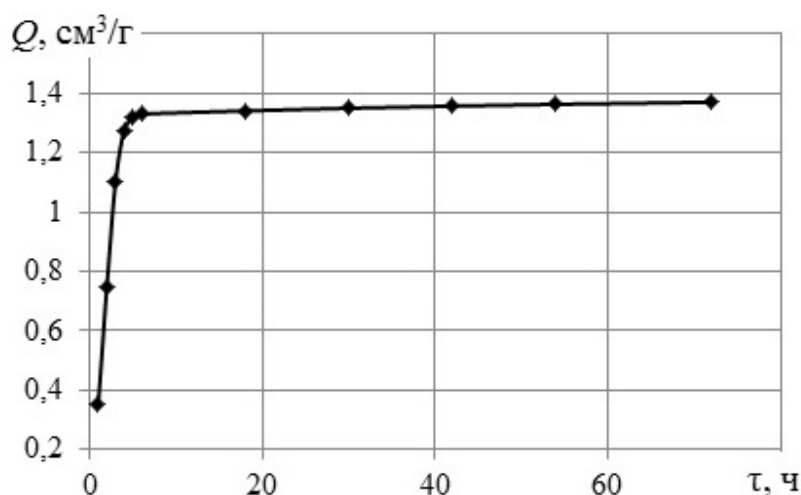


Рис. 2. Кинетика поглощения азота углем с  $V^{\text{daf}} = 15,68 \%$  и размерами частиц 0...3 мм

Результаты исследования показывают, что из 72 часов проведения эксперимента в течение первых шести часов происходит поглощение 97 % азота. Поэтому моделирование данного процесса проведено для основного времени поглощения газа, а коэффициент диффузии азота определен из следующей зависимости [1]:

$$D = k R_1^2 / (\pi^2 \tau_{0,5}),$$

где  $k$  – коэффициент, зависящий от формы гранул;

$\tau_{0,5}$  – время, прошедшее от начала опыта до момента, когда количество адсорбированного вещества достигнет 50 % от равновесной адсорбционной способности, с.

Исходя из рассматриваемой математической модели и экспериментальных данных поглощения азота частицами угля 0...3 мм сферической формы (см. рис. 1), для определения коэффициента диффузии принимаем  $k = 0,308$  и  $\tau_{0,5} = 6940$  с, следовательно,  $D = 1,098 \cdot 10^{-11}$  м<sup>2</sup>/с.

Коэффициент массообмена  $\beta$  в газовой фазе определен из уравнения диффузионного критерия Нуссельта  $Nu_g$  [1, 7]

$$\beta = Nu_g D/d, \quad (3)$$

$$\text{где } Nu_g = 0,515 Re^{0,85} Sc^{0,333} \text{ для } Re < 2; \quad (4)$$

$Re$  – критерий Рейнольдса, равный

$$Re = ud; \quad (5)$$

$Sc$  – критерий Шмидта, равный

$$Sc = \nu/D_m; \quad (6)$$

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости азота, м<sup>2</sup>/с;

$D_m$  – молекулярный коэффициент диффузии азота, м<sup>2</sup>/с;

$d$  – диаметр частиц, м.

Решив уравнения (3) – (6) для рассматриваемых условий, установили значение коэффициента массообмена  $\beta = 2,096 \cdot 10^{-10}$  м/с.

Значения концентрации азота в неподвижной фазе угля, полученные экспериментальным путем  $a_{\text{эксп}}$  и рассчитанные с помощью математической модели  $a_{\text{расч}}$  (см. формулы (1) и (2)) при начальной концентрации азота  $C = 39,73$  моль/м<sup>3</sup>, представлены на рис. 3. Константа Генри определена из соотношения  $\gamma = a/C$  на основании экспериментальных данных и равна 1,08.

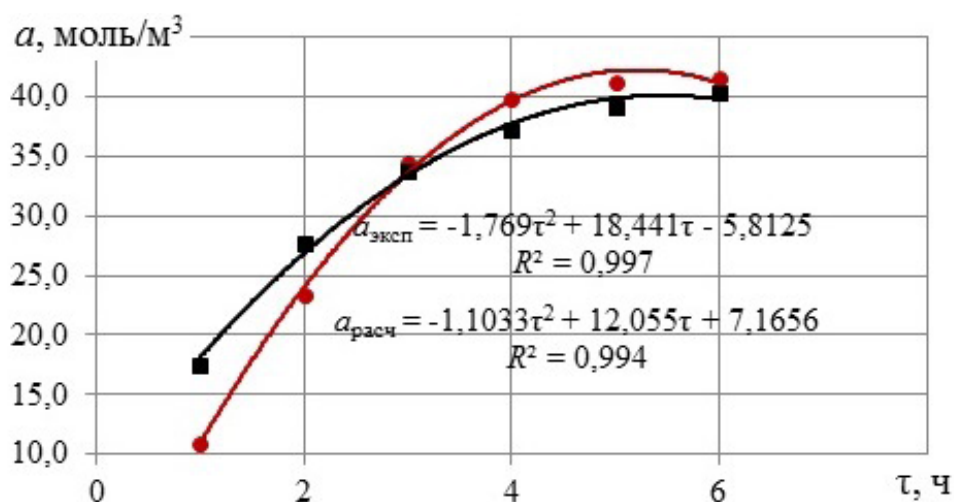


Рис. 3. Динамика концентрации азота в неподвижной фазе угля:

● –  $a_{\text{эксп}}$ ; ■ –  $a_{\text{расч}}$

Сравнительный анализ двух зависимостей показывает отклонение расчетных значений от экспериментальных данных, особенно в начальный период поглощения азота, что, вероятно, связано со сложным механизмом адсорбции, зависящим от степени заполнения адсорбционного пространства. Математическое моделирование проведено при среднем значении коэффициента адсорбции, равном  $\beta_1 = 1,46 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ , и постоянном коэффициенте диффузии газа, однако при изучении влияния этих параметров на процесс поглощения кислорода [5, 6] установлен их переменный характер. Поэтому сделано предположение о зависимости соотношения  $\beta_1/D$ ,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ , от диффузионного критерия Фурье  $Fo_g$ , характеризующего нестационарность процесса массоотдачи вследствие диффузии (рис. 4).

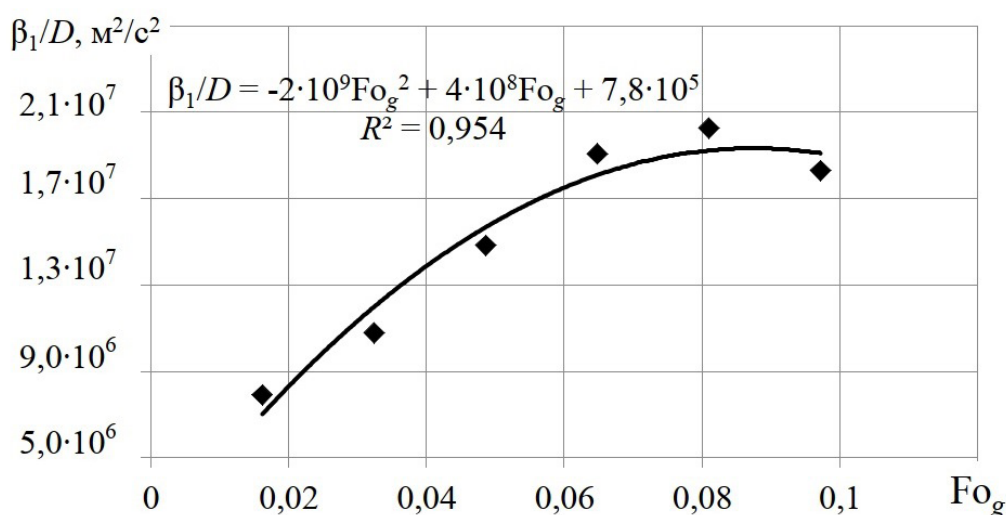


Рис. 4. Зависимость параметров адсорбции азота от диффузионного критерия Фурье

Характер установленной зависимости свидетельствует о постепенном заполнении пор различного размера в исследуемых частицах угля до предельного значения, после которого соотношение  $\beta_1/D$  уменьшается и замедляется процесс поглощения азота.

В результате теоретического исследования получены значения коэффициента адсорбции, которые изменяются в пределах  $\beta_1 = 8,0 \cdot 10^{-5} - 1,85 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$  и использованы для повторного математического моделирования поглощения азота (рис. 5).

Установленная зависимость максимально точно описывает экспериментальные данные и подтверждает правильность использования данной модели для описания процесса адсорбции газа частицами угля 0...3 мм.

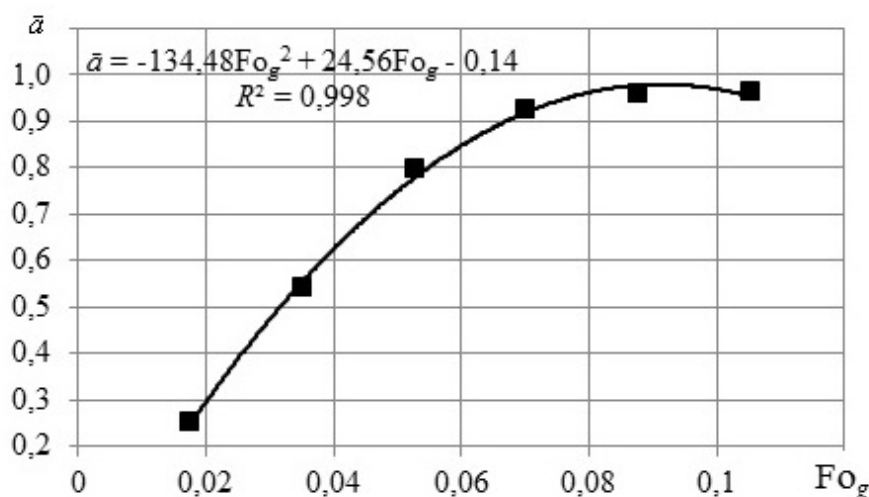


Рис. 5. Зависимость расчетной относительной концентрации азота, поглощенного частицами угля, от диффузионного критерия Фурье

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Используя экспериментальные данные поглощения азота частицами угля средней стадии метаморфизма, методом математического моделирования этого процесса впервые получили значения коэффициента адсорбции исследуемого газа. Установили кинетический характер зависимости соотношения коэффициентов адсорбции и диффузии, описывающей динамику основного поглощения азота.

#### Список литературы / References

1. Кельцев, Н.В. Основы адсорбционной техники / Н.В. Кельцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1984. – 592 с.

Kel'tsev N.V. *Osnovy adsorbtsionnoi tekhniki. 2-e izd., pererab. i dop.* [Basics of adsorption technics. The 2<sup>nd</sup> revised edition]. Moscow, Khimiya Publ., 1984, 592 p. (In Russian).

2. Новый справочник химика и технолога. Радиоактивные вещества. Вредные вещества. Гигиенические нормативы: науч. изд. / ред. А.В. Москвин. – СПб.: Проффессионал, 2005. – 1142 с.

Moskvin A.V. [ed.] *Novyi spravochnik khimika i tekhnologa. Radioaktivnye veshhestva. Vrednye veshhestva. Gigenicheskie normativy: nauch. izd.* [Chemical technologist's new reference book. Radioactive substances. Noxious substances. Hygienic standards: scientific publication]. Saint Petersburg, Professional Publ., 2005, 1142 p. (In Russian).

3. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: Арпи, 2012. – 656 с.

Pashkovskiy P.S., Grekov S.P., Zinchenko I.N. *Aktual'nye voprosy bor'by s samovozgoraniem uglya* [Actual problems of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p. (In Russian).

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

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

5. Греков, С.П. Кинетика адсорбции кислорода газонасыщенными углями / С.П. Греков, В.П. Орликова // Наукоемкие технологии разработки и использования минеральных ресурсов: науч. журнал / под общ. ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2021. – № 7. – С. 341 – 345.

Grekov S.P., Orlikova V.P. *Kinetika adsorbtsii kisloroda gazonasyshhennymi uglyami* [Kinetics of adsorption of oxygen by gas-saturated coal]. *Naukoyomkie tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov: nauch. zhurn. / pod obshh. red. Fryanova V.N.* [Science-driven technologies of exploitation and utilization of mineral resources: scientific journal / Fryanov V.N. (ed.)]. Novokuznetsk, 2021, no. 7, pp. 341-345. (In Russian).

6. Греков, С.П. Особенности адсорбции кислорода каменными углями / С.П. Греков, В.П. Орликова // Вестник Академии гражданской защиты: науч. журн. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2021. – Вып. 3(27). – С. 16 – 22.

Grekov S.P., Orlikova V.P. *Osobennosti adsorbtsii kisloroda kamennymi uglyami* [Specifics of oxygen adsorption by black coal]. *Vestnik Akademii grazhdanskoi zashchity: nauch. zhurn.* [Bulletin of the Civil Defence Academy: scientific journal]. Donetsk, GOUVPO “Akademiya grazhdanskoi zashchity” MChS DNR Press, 2021, issue 3(27), pp. 16-22. (In Russian).

7. Белоглазов, И.Н. Основы расчета фильтрационных процессов / И.Н. Белоглазов, В.О. Голубев. – М.: Руда и Металлы, 2002. – 210 с.

Beloglazov I.N., Golubev V.O. *Osnovy raschyota fil'tratsionnykh protsessov* [Computational basics of filtration processes]. Moscow, Ruda i Metally Publ., 2002, 210 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 15.12.2021

*Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;  
Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior scientific researcher; e-mail: obep.niigd@list.ru;  
Viktoria Petrovna Orlikova, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: orlikova.69@yandex.ua*  
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,  
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-79-07

## THEORETICAL INVESTIGATION OF PARAMETERS OF NITROGEN ADSORPTION BY MINERAL COAL

**Purpose.** To determine the parameters that characterize the process of nitrogen adsorption from a two-component gas mixture by the mineral coal for further investigation of the solid fuel spontaneous heating process.

**Methods.** Mathematical modeling of nitrogen adsorption based on the experimentally obtained isotherms of the adsorption of gas in question, and phenomenological method of determination of the process parameters.

**Results.** The method for determining the relative concentration of nitrogen adsorbed on the solid surface of coal particles of the medium metamorphic grade has been proposed. The adsorption coefficients have been obtained for the nitrogen contained in the mix with air, and the dynamics of this coefficient has been established during the period of main adsorption of gas.

**Scientific novelty.** The novel numeric values of the nitrogen adsorption coefficients have been obtained which will make it possible to assess the air influence on the oxidation process and the coal spontaneous heating.

**Practical value.** The derived values of the nitrogen adsorption coefficients will be used with the oxygen adsorption parameters in study of the coal low-temperature oxidation which will improve the precision of the spontaneous combustion hazard prediction.

**Keywords:** *low-temperature oxidation; oxidation adsorption; diffusion; nitrogen; coal; mathematical modeling.*

УДК [614.842.612:544.723]:[546.132+577.112.342+546.171.1]

**Валерий Васильевич Шаповалов**, д-р хим. наук, проф., зав. каф.; e-mail: wwshapovalov@gmail.com  
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел.: (+38 062) 301-03-87

**Владислав Вячеславович Шлома**, инж. I кат.; e-mail: ilsin1995@gmail.com

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-51

## ЖИДКОФАЗНЫЙ АБСОРБЕНТ КИСЛОРОДА НА ОСНОВЕ СИСТЕМЫ КОБАЛЬТ(II) – ГИСТИДИН – АММИАК

**Цель.** Получение жидкофазных абсорбентов кислорода на основе системы, содержащей соль двухвалентного кобальта и гистидина, модифицированной добавлением аммиака.

**Методы.** Информационно-аналитический и экспериментальный методы для анализа эффективности жидкофазных абсорбентов кислорода на основе систем кобальт(II) – гистидин, кобальт(II) – гистидин – аммиак.

**Результаты.** Исследование процесса поглощения кислорода жидкофазным абсорбентом показало, что использование систем позволяет снизить концентрацию кислорода в замкнутом объеме до уровня, при котором прекращается процесс горения.

**Научная новизна.** Состоит в возможности создания комбинированной противопожарной системы, основанной на связывании кислорода жидкофазными абсорбентами. В качестве абсорбентов предложены комплексные соединения кобальта с азотсодержащими лигандами. Теоретически и экспериментально обоснованы пути повышения активности абсорбентов по отношению к кислороду.

**Практическая значимость.** Результаты экспериментальных исследований помогут разработать новые системы пожаротушения, основанные на снижении концентрации кислорода в закрытом помещении до пожаробезопасного уровня.

**Ключевые слова:** система пожаротушения; кобальт; гистидин; тетраборат натрия; аммиак; кислород; абсорбент кислорода.

**Постановка проблемы.** Крупные пожары с человеческими жертвами и значительными материальными потерями заставляют обратить особое внимание на качество мер предупреждения и тушения пожаров. Прямое предназначение систем пожаротушения – предотвращение, ограничение развития, тушение пожара, защита от пожара людей и материальных ценностей. Известно, что снижение концентрации кислорода в объеме до 14...15 % [1] предотвращает пламенное горение или препятствует ему. Одним из способов снижения концентрации кислорода может быть использование абсорбентов кислорода. Общеизвестно, что один из наиболее эффективных абсорбентов кислорода – гемоглобин [2], активный центр которого содержит атом двухвалентного железа Fe(II), окруженный пятью атомами азота. Четыре атома азота принадлежат специфической структуре – протопорфиру, а один принадлежит аминокислоте – гистидину. Белковая часть молекулы гемоглобина осуществляет тонкую электронную настройку атома Fe(II), вследствие чего он

не окисляется до трехвалентного состояния и выполняет функцию обратимого переносчика кислорода в организме. Попытки создать синтетические аналоги гемоглобина на основе соединений железа не удалось, но было установлено, что составная часть гемоглобина – гистидин (далее – His) – образует с атомом двухвалентного кобальта  $\text{Co(II)}$  систему типа (рис. 1), который обратимо связывает молекулярный кислород из воздуха, что было впервые опубликовано в работе [3].

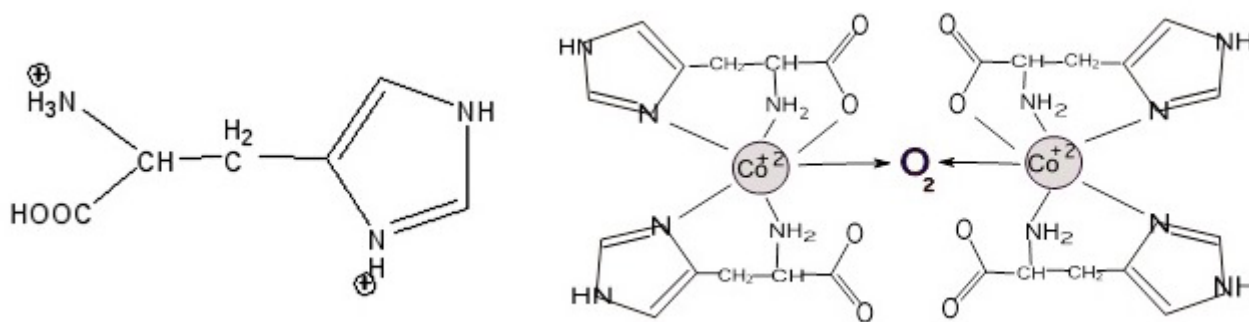


Рис. 1. Гистидин и гистидинатная система кобальта(II) с молекулой  $\text{O}_2$

В дальнейшем ряд исследователей, в частности В.В. Шаповалов [4], изучили и другие многочисленные системы  $\text{Co(II)}$  с кислородом. Способность связывать молекулярный кислород выражена у синтетических комплексных соединений, содержащих некоторые ионы 3d-металлов, в основном у кобальта. Активность к молекуле  $\text{O}_2$  проявляют комплексные соединения, в которых ион металла координирован с лигандами через атомы азота. Имеются некоторые сведения о комплексных соединениях с кислородом, в которых атом металла окружен лигандами, которые содержат донорные атомы фосфора, иногда серы. Известные координационные соединения  $\text{Co(II)}$  с молекулой  $\text{O}_2$  (рис. 2), иначе говоря, оксигенированные, можно разделить на одноподъядерные (моноподъядерные) и двухъядерные (биподъядерные) соединения. В последних молекула  $\text{O}_2$  расположена между двумя атомами кобальта.

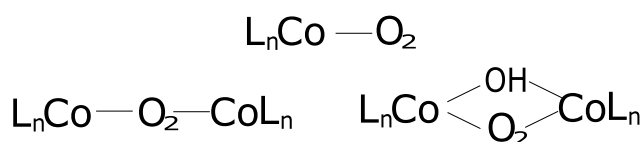
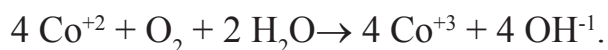


Рис. 2. Типы координационных соединений  $\text{Co(II)}$  с молекулой  $\text{O}_2$

Двухъядерные комплексы подразделяются на моностиковые и бимостиковые. По прочности связи молекулы  $\text{O}_2$  с ионом кобальта оксигенированные комплексы можно разделить на две группы: необратимо связывающие  $\text{O}_2$  и обратимо связывающие – переносчики молекулярного  $\text{O}_2$ , которые при слабом нагревании или при уменьшении давления легко отдают присоединенный  $\text{O}_2$ .

Из приведенных на рис. 2 формул следует, что в качестве абсорбентов кислорода предпочтительны моноядерные комплексы, в которых каждый атом  $\text{Co(II)}$  связывает молекулу  $\text{O}_2$ . В количественном соотношении это составляет  $22,4 \text{ дм}^3 \text{ O}_2$  (при нормальных условиях) на 1 моль  $\text{Co(II)}$  ( $58,9 \text{ г}$  кобальта). Однако получение одноядерных оксигенированных комплексов затруднено необходимостью создания особых условий, которые заключаются в стабилизации одноядерных структур и предотвращении образования двухъядерных форм, что реализовано в гемоглобине.

Большинство координационных соединений  $\text{Co(II)}$  с молекулярным  $\text{O}_2$  представляют собой двухъядерные соединения. Теоретическая емкость по кислороду не зависит от того, являются ли они моно- или бимостиковыми, и составляет  $11,2 \text{ дм}^3$  кислорода на 1 моль  $\text{Co(II)}$ . В случае окисления  $\text{Co(II)}$  в  $\text{Co(III)}$  теоретическая емкость абсорбента составит  $5,6 \text{ дм}^3 \text{ O}_2$  на 1 моль  $\text{Co(II)}$ . Это связано с тем, что схема необратимого окисления соответствует суммарному уравнению



Однако первой стадией абсорбции  $\text{O}_2$  комплексами металлов всегда является образование структур, содержащих  $\text{O}_2$  в молекулярном виде. В дальнейшем происходит разрушение данных структур с необратимым окислением иона металла.

Очевидно, что эффективность абсорбентов  $\text{O}_2$  для технических целей определяется максимально возможными емкостными и кинетическими характеристиками. Для систем пожаротушения фиксация кислорода также должна быть прочной.

В качестве модельного вещества для изучения закономерностей абсорбции кислорода выбрана система  $\text{Co(II)}\text{--His}$ .

**Методика эксперимента.** Схема лабораторной установки для определения характеристик жидкофазных абсорбентов кислорода представлена на рис. 3. Основной элемент установки – измерительная ячейка 3, в которой готовят раствор абсорбента. В ячейку при открытом кране 7 вводят раствор соли кобальта. Далее при закрытом кране 7 добавляют раствор лиганда. Перемешивают раствор якорем 2, вращаемым магнитным полем мешалки 1. Изменение давления в измерительной ячейке вследствие поглощения кислорода фиксируют высокоскоростным датчиком давления GY-68 8 с диапазоном измеряемого давления  $30000 \dots 110000 \text{ Па}$ , чувствительностью  $\pm 2 \text{ Па}$  и временем отклика  $7,5 \text{ мс}$ . Датчик сопряжен с микроконтроллером AVR 328 9 с USB-адаптером, который выводит данные давления из микроконтроллера на компьютер 10 для визуализации, обработки и сохранения данных.

Учитывая исходное содержание кислорода в воздухе, равное  $20,8 \%$ , остаточную концентрацию кислорода в газовой фазе над абсорбентом рассчитывают по формуле

$$O_2 = 20,8 - \frac{100(P_{\text{и}} - P_{\text{т}})}{P_0},$$

где  $O_2$  – остаточное количество кислорода в газовой фазе над абсорбентом, %;

$P_{\text{и}}$  – исходное давление в измерительной ячейке, гПа;

$P_{\text{т}}$  – текущее давление в ячейке, гПа.

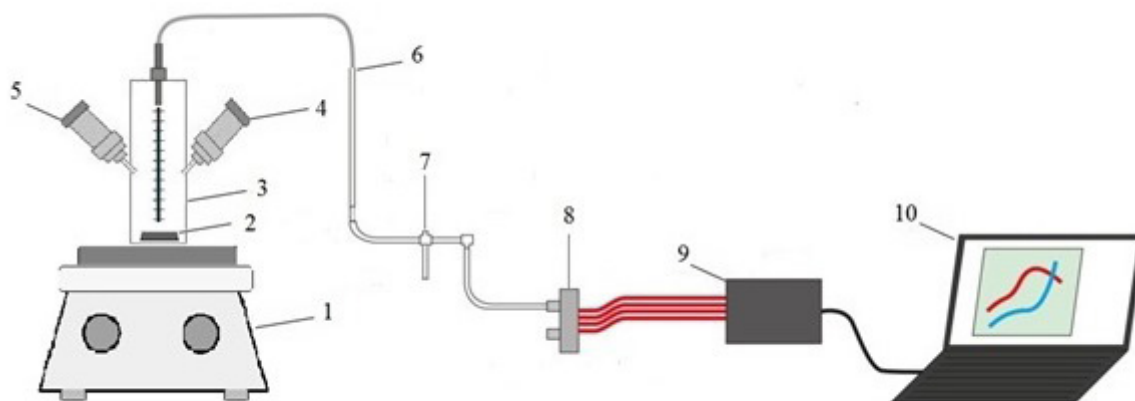


Рис. 3. Лабораторная установка для определения характеристик жидкофазных абсорбентов кислорода:

1 – магнитная мешалка; 2 – якорь; 3 – измерительная ячейка; 4, 5 – шприцы; 6 – трубка; 7 – кран; 8 – датчик давления; 9 – микроконтроллер с USB-адаптером; 10 – компьютер

Начальную и конечную концентрацию кислорода в экспериментальной установке измеряли стандартным анализатором кислорода МИК-М-01.

В работе в качестве соли кобальта(II) использовали  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , в качестве лиганда – His фирмы «Реанал». Мольное соотношение  $\text{Co(II)}:\text{His}$  поддерживалось равным 1:2 в соответствии со структурой, представленной на рис. 1.

**Цель работы** – получение жидкофазных абсорбентов кислорода на основе системы, содержащей соль двухвалентного кобальта и гистидина, модифицированной добавлением аммиака.

**Материалы исследования.** His – слабая кислота (трехосновная), и донорные атомы кислорода и азота в ее молекуле заблокированы ионами водорода. По этой причине в кислой или нейтральной среде образование системы Co с His, способной абсорбировать кислород, затруднено. Как показали результаты экспериментальных исследований, абсорбция кислорода в нейтральном растворе протекает очень слабо и практического интереса не представляет. Исходя из значений констант кислотной диссоциации ( $\text{p}K_1 = 1,7$ ;  $\text{p}K_2 = 6,02$ ;  $\text{p}K_3 = 9,09$ ), полная нейтрализация ионов водорода и, соответственно, образование системы  $\text{Co(II)}\text{--His}$  происходит при  $\text{pH} > 9$ . Поэтому был проведен ряд экспериментов в слабощелочной среде при  $\text{pH} = 9,2$ . Это обеспечивалось и поддерживалось добавлением в раствор в качестве буфера рН тетрабората

натрия  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . На рис. 4 представлена типичная кривая абсорбции кислорода системой  $\text{Co(II)}\text{--His}$  в слабощелочном растворе.

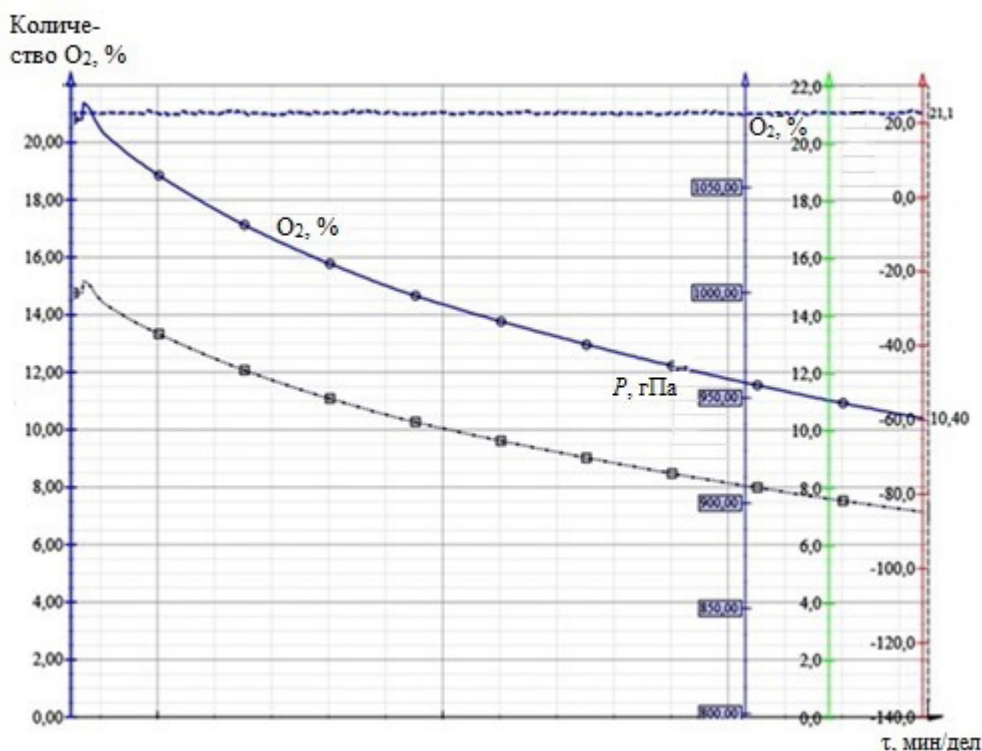


Рис. 4. Абсорбция  $\text{O}_2$  из воздуха раствором системы  $\text{Co(II)}\text{--His}$ :  
пунктирная линия – давление в системе, гПа; цена деления по оси абсцисс 1 мин;  
исходный объем измерительной ячейки  $166,7 \text{ см}^3$ ; объем раствора абсорбента  
в ячейке  $10 \text{ см}^3$ ; концентрация  $\text{Co(II)}$   $0,4 \text{ моль/дм}^3$ ; молярные соотношения  
компонентов в абсорбенте  $\text{Co(II)}:\text{His} = 1:2$ ;  $\text{pH}=9,2$

Из анализов полученных результатов следует, что система  $\text{Co(II)}\text{--His}$  позволяет снизить концентрацию кислорода в замкнутом объеме до пожаробезопасного уровня ( $14 \text{ \%}$  и ниже). Однако скорость абсорбции кислорода и емкость весьма незначительны. Молекула кислорода вследствие своих окислительных свойств реагирует с атомами, обладающими избыточной электронной плотностью. В случае с системами кобальта такая избыточная электронная плотность на атоме кобальта создается за счет координированных с ним донорных атомов лигандов, в первую очередь атомов азота. Как видно из представленных на рис. 5 структур активных центров, в системе  $\text{Co(II)}\text{--His}$  ион кобальта окружен четырьмя атомами азота, причем сильными донорными свойствами обладают лишь атомы азота аминогруппы  $\text{--NH}_2$ . Атомы азота  $\text{--N=}$  в составе пиррольного кольца гистидина и атомы кислорода обладают слабыми донорными свойствами. Следовательно, связь  $\text{Co--O}_2$  слабая, и система  $\text{Co(II)}\text{--His}$  проявляет свойства переносчика кислорода. Основываясь на приведенных соображениях, было усилено донорное окружение атома кобальта введением в структуру  $\text{Co(II)}\text{--His}$  аммиака  $\text{NH}_3$  (рис. 5).

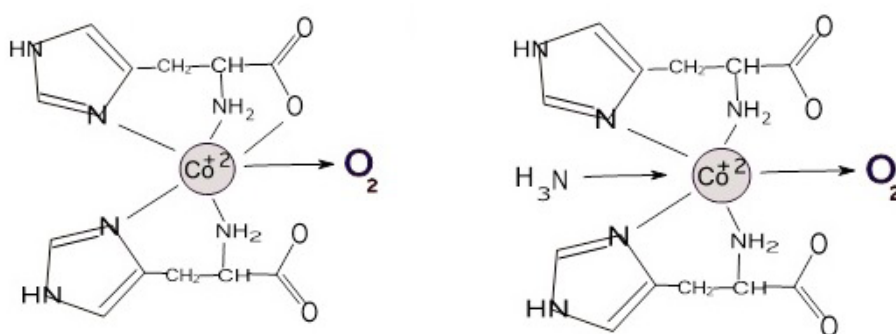


Рис. 5. Активные центры связывания кислорода

Аммиак, как вещество основного характера, с одной стороны, повышает pH раствора, что способствует координации His, а с другой – должен значительно увеличить электронную плотность на атоме кобальта и способствовать связыванию кислорода. Результат одного из экспериментов по абсорбции  $O_2$  при использовании системы  $Co(II)$ –His– $NH_3$  представлен на рис. 6. Сравнение кривых абсорбции кислорода, представленных на рис. 4 и 6, а также данные из таблицы подтверждают приведенные выше предположения. Увеличение донорных свойств лигандов, координированных с атомом кобальта, значительно повышает эффективность абсорбента. Это относится и к абсорбционным, и к кинетическим характеристикам.

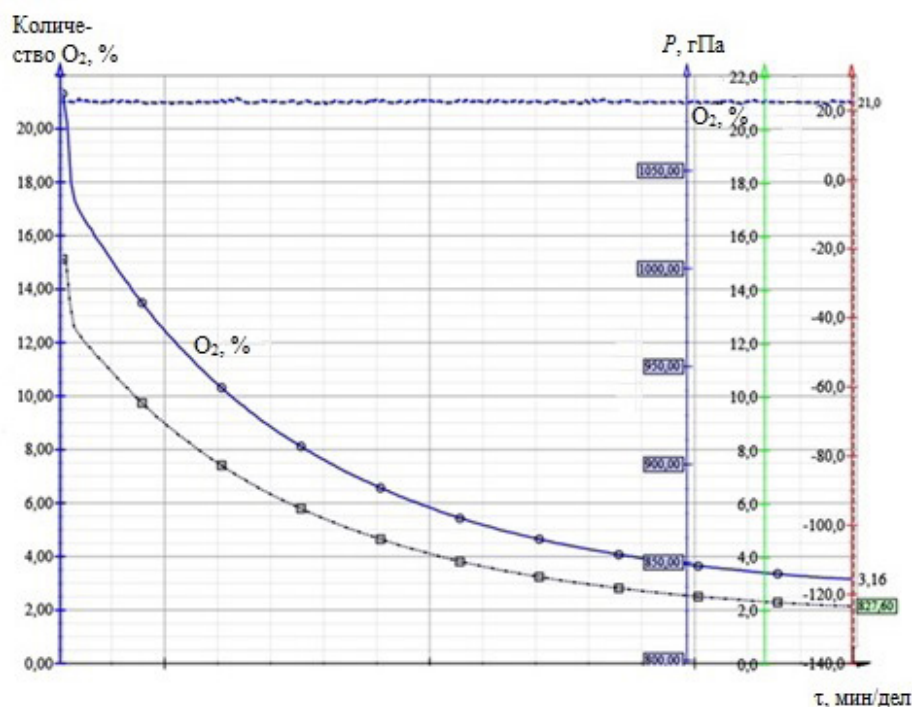


Рис. 6. Абсорбция  $O_2$  из воздуха раствором системы  $Co(II)$ –His– $NH_3$ : пунктирная линия – давление в системе, гПа; цена деления по оси абсцисс – 1 мин; исходный объем измерительной ячейки 166,7 см<sup>3</sup>; объем раствора абсорбента в ячейке 12 см<sup>3</sup>; концентрация  $Co(II)$  0,4 моль/дм<sup>3</sup>; мольные соотношения компонентов в абсорбенте  $Co(II)$ :His: $NH_3$  = 1:2:4,5

Экспериментальные данные количественных характеристик абсорбции кислорода системами Co(II)–His и Co(II)–His–NH<sub>3</sub>

| Состав абсорбента  |                            |          |                                               |                            | Объем<br>абсорбента,<br>см <sup>3</sup> | Концентрация<br>O <sub>2</sub> в ячейке<br>в конце<br>эксперимента,<br>% | Удельная<br>емкость<br>по кислороду,<br>м <sup>3</sup> /м <sup>3</sup><br>раствора |
|--------------------|----------------------------|----------|-----------------------------------------------|----------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| Раствор Co(II)     |                            | His      | Раствор NH <sub>3</sub>                       |                            |                                         |                                                                          |                                                                                    |
| V, см <sup>3</sup> | C,<br>моль/дм <sup>3</sup> | Масса, г | V, см <sup>3</sup>                            | C,<br>моль/дм <sup>3</sup> |                                         |                                                                          |                                                                                    |
| 10,0               | 0,40                       | 1,24     | 2,00                                          | 9,0                        | 12,0                                    | 3,16                                                                     | 2,27                                                                               |
| 10,0               | 0,40                       | 1,24     | Na <sub>2</sub> B <sub>4</sub> O <sub>7</sub> |                            | 10,0                                    | 10,4                                                                     | 1,63                                                                               |

**Выводы.** Изучение модели системы, содержащей кобальт и гистидин, абсорбирующей кислород, позволило установить принципиальную возможность снижения концентрации кислорода в замкнутом объеме до пожаробезопасного уровня.

После модификации аммиаком емкостные и кинетические характеристики системы улучшаются. С их увеличением улучшаются и характеристики абсорбента, что не противоречит теоретическим представлениям и подтверждено экспериментально. Этот факт открывает возможности поиска абсорбентов кислорода с реагентами, которые способны увеличить донорные свойства атомов азота.

Список литературы / References

1. Будыкина, Т.А. Превентивная противопожарная защита / Т.А. Будыкина, К.Ю. Будыкина // Современные инновации в науке и технике: сб. науч. тр. 7-й Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Курск, 13–14 апреля 2017 г. / отв. ред. А.А. Горохов. – Курск: Университетская книга, 2017. – С. 47 – 50.

Budykina T.A., Budykina K.Yu. *Preventivnaya protivopozharnaya zashhita* [Preventive fire protection]. *Sovremennye innovatsii v nauke i tekhnike: sb. nauch. tr. 7-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem, Kursk, 13-14 aprelya 2017 g. / otv. red. A.A. Gorokhov* [Modern innovations in science and engineering: collection of scientific papers of the 7<sup>th</sup> All-Russian scientific and technical conference with international participation, Kursk, April 13-14, 2017 / A.A. Gorokhov, editor-in-chief]. Kursk, Universitetskaya kniga Publ., 2017, pp. 47-50. (In Russian).

2. Ганнова, Ю.Н. Определение условий образования оксигенированных комплексов в системе кобальт(II) – глицилаланин – бипиридил / Ю.Н. Ганнова, Е.В. Фурман, В.В. Катыхева // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Серія: Хімія і хімічна технологія. – 2013. – № 2(21). – С. 83 – 91.

Gannova Yu.N., Furman E.V., Katysheva V.V. *Opredelenie uslovii obrazovaniya oksigenirovannykh kompleksov v sisteme kobal't(II) – glitsilalanin – bipiridil*

[Definition of conditions for formation of oxygenized complexes in cobalt(II) – glycyl-alanine – bipyridyl system]. *Naukovi pratsi Donets'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Khimiia i khimichna tekhnolohiia – Academic papers of the Donetsk national technical university. Chemistry and chemical technology series*, 2013, no. 2(21), pp. 83-91. (In Russian).

3. Burk, D. Reversible complexes of cobalt, histidine and oxygen gas / D. Burk, J.Z. Heaton, L. Caroline, A. L. Schade // *The Journal of Biological Chemistry*, 1947, vol. 165, pp. 723 – 724.

4. Шаповалов, В.В. Химия простых и координационных соединений источников и переносчиков молекулярного кислорода: автореф. дис. ... д-ра хим. наук. – Киев, 2004. – 40 с.

Shapovalov V.V. *Khimiya prostykh i koordinatsionnykh soedinenii istochnikov i perenoschikov molekulyarnogo kisloroda: avtoref. dis. ... d-ra khim. nauk* [Chemistry of simple and coordination compounds of sources and carriers of molecular oxygen: Dr. chem. sci. diss. abstract]. Kiev, 2004, 40 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 20.12.2021

**Valery Vasilyevich Shapovalov**, Dr. Sci. (Chem.), prof., head of chair; e-mail: wwshapovalov@gmail.com  
The State Educational Institution of Higher Occupational Education  
“Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 301-03-87

**Vladislav Vyacheslavovich Shloma**, engineer of the 1<sup>st</sup> category; e-mail: ils1995@gmail.com

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-51

## COBALT(II) – HISTIDINE – AMMONIA SYSTEM-BASED LIQUID-PHASE ABSORBENT OF OXYGEN

**Purpose.** Preparation of the liquid-phase oxygen absorbents based on the system containing cobalt(II) salt and histidine and modified by addition of ammonia.

**Methods.** Information-analytical and experimental methods for analyzing the effectiveness of the liquid-phase oxygen absorbents based on cobalt(II) – histidine, cobalt(II) – histidine – ammonia systems.

**Results.** The investigation of process of oxygen absorption by the liquid-phase absorbent has shown that employment of the systems permits to reduce the oxygen concentration in the confined volume down to the level when the burning process ceases.

**Scientific novelty.** It consists in the possibility of creating the combined fire-fighting system based on binding the oxygen by the liquid-phase absorbents. The complex compounds of cobalt with the nitrogen-containing ligands have been suggested as absorbents. The methods for improving the absorbents activity towards the oxygen have been theoretically and experimentally substantiated.

**Practical value.** The results of the experimental investigations will assist to develop the new fire-extinguishing systems based on the reduction of oxygen concentration in a confined space down to the fire safe level.

**Keywords:** fire-extinguishing system; cobalt; histidine; sodium tetraborate; ammonia; oxygen; oxygen absorbent.

**УДК 614.844.2**

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

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

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

*Денис Александрович Тимошенко, начальник; e-mail: denistimoshenko8293@gmail.com*

*59-я пожарно-спасательная часть ГПСО МЧС ДНР*

*287100, пгт. Тельманово, ул. Ленина, 171. Тел.: (+38 071) 311-73-74*

## **ПАРАМЕТРЫ ТУШЕНИЯ ПОЖАРОВ ТОНКОРАСПЫЛЕННОЙ ВОДОЙ НА НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗВИТИЯ**

**Цель.** Определение расчетных параметров средств тушения пожаров тонкораспыленной водой в начальной стадии развития.

**Методы.** Аналитические исследования параметров нагревания и испарения капель тонкораспыленной воды в очаге пожара и флегматизации пламенной зоны образующимся водяным паром.

**Результаты.** Установлена зависимость испарения капель воды и замещения кислорода из зоны горения образующимся паром от интенсивности подачи тонкораспыленной воды в очаг пожара.

**Научная новизна.** Рассмотрен механизм флегматизации очага пожара образующимся при испарении капель воды водяным паром. Результаты подтверждают опытные данные по тушению отдельных очагов пожара тонкораспыленной водой из ранцевых огнетушителей.

**Практическая значимость.** Результаты могут быть использованы при проектировании средств пожаротушения тонкораспыленной водой и разработке тактики тушения пожаров ранцевыми огнетушителями.

**Ключевые слова:** тонкораспыленная вода; пожаротушение; интенсивность подачи; капля; время нагревания; время испарения; флегматизация.

**Постановка проблемы.** Водяное пожаротушение – один из наиболее эффективных способов ликвидации пожаров по следующим причинам:

- сравнительно небольшая стоимость воды;
- доступность и надежность подачи потребителю;
- экологическая безопасность;
- физико-химические свойства воды как эффективного пожаротушающего средства.

В мире ликвидируют до 90 % всех пожаров с использованием воды [1].

В то же время этот способ обладает существенными недостатками:

- большие удельные расходы на тушение (свыше  $0,8 \text{ дм}^3/(\text{с} \cdot \text{м}^2)$ );
- нанесение дополнительного и весьма значительного ущерба за счет залива водой помещений и материальных ценностей;
- необходимость сооружения и эксплуатации капитальных инженерных сооружений (насосные и дренажные станции, резервуары для хранения резервного запаса воды, дренажные и водопроводные системы, водопитатели и др.);
- сложный регламент и высокая стоимость технического обслуживания установок пожаротушения и систем пожарного водоснабжения.

По статистике, при тушении пожара расходуют в среднем  $200 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ , в то время как по расчетам минимальный необходимый расход воды для ликвидации пламенного горения составляет  $1,0 \dots 2,0 \text{ дм}^3/\text{м}^2$ . В большинстве случаев только 30 % воды, подаваемой на тушение пожара, используется непосредственно для ликвидации огня, 70 % расходуется нецелесообразно [2], в связи с чем возникает проблема рационального использования воды. Наиболее актуально это для высотных зданий и сооружений, где пожар быстро развивается по вертикали вверх, происходит интенсивное задымление возможных эвакуационных путей и выход из строя системы противопожарной защиты.

Разработчики систем водяного пожаротушения для высотных зданий сталкиваются со следующими проблемами:

- иногда невозможно обеспечить подачу воды из городской водопроводной сети;
- большой расход энергии для подачи воды на верхние этажи;
- пролив воды при тушении на нижележащие этажи с повреждением материальных ценностей, затоплением электрооборудования и нарушением других систем безопасности объекта [3].

Тонкораспыленная вода практически не имеет конкуренции для тушения пожаров в общественных зданиях, сооружениях и других объектах, для которых минимизация вторичного ущерба – актуальная проблема (музеи, выставочные центры, библиотеки, архивы и др.). Исследование эффективности использования тонкораспыленной воды для защиты высотных зданий – первоочередная задача.

К оборудованию для тушения тонкораспыленной водой относят: ранцевые огнетушители, оросители различного назначения, автоматические установки пожаротушения и пожарные стволы.

Согласно работе [4] число пожаров, которые были потушены первичными средствами пожаротушения, составляет 20 % в крупных городах и около 35 % в целом по России. То есть ручные огнетушители важны при тушении пожара и имеют следующие преимущества:

- высокая эффективность тушения;
- экологическая безопасность;
- технологичность (простота обслуживания, многократность перезарядки);
- практичность (гарантийный срок эксплуатации – не менее 10 лет с учетом перезарядки, доступность огнетушащего состава).

Если горючие материалы аварийного помещения сосредоточены на отдельных участках, то предпочтительнее локальное пожаротушение с использованием первичных средств пожаротушения.

Для повышения эффективности пожаротушения тонкораспыленной водой необходимо теоретически оценить основные параметры тушения:

- интенсивность подачи воды  $J_v$ ,  $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;
- время тушения  $\tau$ , с;
- средний диаметр капель  $d_k$ , м.

**Анализ последних публикаций.** Параметры тушения пожаров тонкораспыленной водой в начальной стадии их возникновения рассмотрены в работах [5 – 10], однако приемлемая методика расчета расхода тонкораспыленной воды при тушении пожара отсутствует. В некоторых работах ставят под сомнение возможность объемного пожаротушения тонкораспыленной водой, хотя экспериментально доказано наличие такого эффекта у мелкодисперсных водных капель [11].

В работах А.Г. Виноградова проанализировано взаимодействие излучения очага пожара с водяной завесой из тонкораспыленной воды [12]. В.П. Олышанский рассматривает баллистику испаряющихся капель воды [13].

Таким образом, для повышения эффективности пожаротушения тонкораспыленной водой необходимо теоретически оценить основные параметры тушения: интенсивность подачи воды, время, расход воды.

**Цель исследования.** Определить параметры флегматизации зоны горения водяным паром, образующимся при испарении капель тонкораспыленной воды.

**Изложение основного материала.** Огнетушащее действие тонкораспыленной воды включает следующие механизмы:

- охлаждение зоны горения путем поглощения тепла при нагревании и испарении капель;
- флегматизация зоны горения образующимися парами воды;
- охлаждение горячей поверхности осаждающимися каплями воды.

При испарении воды в зоне горения образуется значительное количество пара, флегматизирующего зону пламени, при этом снижается концентрация кислорода, скорость его диффузии в область горения и тем самым уменьшается интенсивность реакции горения и количество выделяющейся теплоты.

При снижении концентрации кислорода до 14...16 % пламенное горение прекращается. Не успевшие испариться капли воды попадают на горящую поверхность, снижая ее температуру и поступление летучих веществ в зону пламени.

При нагревании 1 дм<sup>3</sup> воды от 20 до 100 °С поглощается количество теплоты, равное 0,335 МДж. При испарении этого объема воды поглощается ещё 2,257 МДж.

Расчеты, основанные только на тепловом балансе пламени и испаряющихся капель воды, не учитывают изменения концентрации кислорода в зоне горения. При быстром испарении водяной пар замещает воздух в зоне горения и снижает интенсивность тепловыделения. Прежде всего этот эффект достигается с малым размером капель тонкораспыленной воды.

В то же время существует ограничение минимального размера капель, так как от очага пожара исходит конвективный поток горючих газов (со скоростью примерно 7,7 м/с при развитом пожаре [5]), который удаляет мелкие капли воды

(размером менее 20 мкм) из зоны горения. Механизм тушения вытеснением кислорода паром становится доминирующим для капель тонкораспыленной воды диаметром  $20 < d_k < 200$  мкм.

Определим время нагревания и испарения капель при тушении пожаров тонкораспыленной водой в начальной стадии с помощью уравнения

$$\frac{1}{6} \rho_{\text{в}} c_{\text{в}} \pi (d_{\text{к}})^3 \frac{dT_{\text{к}}}{d\tau} = \pi (d_{\text{к}})^2 \alpha (\bar{T} - T_{\text{к}}), \quad (1)$$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;

$c_{\text{в}}$  – удельная теплоемкость воды, Дж/(кг·К);

$d_{\text{к}}$  – средний диаметр капель, м;

$T_{\text{к}}$  – температура капли, К;

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи поверхности капли, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\bar{T}$  – среднеобъемная температура в помещении, К;

$\tau$  – время, с.

Интегрируя уравнение (1), получим время нагревания капли до температуры кипения (принимая, что нагревание протекает на участке от точки вылета из огнетушителя до очага пожара)

$$\tau_{\text{н}} = \frac{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} d_{\text{к}}}{6\alpha} \ln \left( \frac{\bar{T} - T_{\text{к0}}}{\bar{T} - T_{\text{кип}}} \right), \quad (2)$$

где  $T_{\text{к0}}$  – начальная температура капли, К;

$\tau_{\text{н}}$  – время нагревания капли воды до температуры кипения  $T_{\text{кип}}$ , с.

Коэффициент теплоотдачи определяют по эмпирической формуле [5]

$$\alpha = \frac{\lambda}{d_{\text{к}} / 2} (1 + 0,08 \text{Re}^{0,66}), \quad (3)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности горючего газа, Вт/(м·К);

Re – критерий Рейнольдса.

Учитывая, что размер капли мал, в выражении (3) принимаем  $(1 + 0,08 \text{Re}^{0,66}) \approx 1$ , тогда из выражения (2) получаем время нагревания капли

$$\tau_{\text{н}} = \frac{\rho_{\text{в}} c_{\text{в}} d_{\text{к}}}{3\lambda} \ln \left( \frac{\bar{T} - T_{\text{к0}}}{\bar{T} - T_{\text{кип}}} \right).$$

Время испарения капли определим из следующего уравнения (принимая, что испарение происходит в зоне очага пожара):

$$\frac{dm_{\text{к}}}{d\tau} = \frac{\alpha F_{\text{к}} (T_{\text{ф}} - T_{\text{кип}})}{R_{\text{в}}},$$

где  $F_k$  – площадь поверхности капли воды,  $\text{м}^2$ ;

$m_k$  – масса капли воды,  $\text{кг}$ ;

$R_v$  – удельная теплота испарения воды,  $\text{Дж/кг}$ ;

$T_\phi$  – температура в зоне горения ( $T_\phi = T_{\text{гор}}$ , в зависимости от вида горючих материалов),  $\text{К}$ .

Выразив массу капли через ее диаметр, получим

$$\frac{d_k d(d_k)}{d\tau} = \frac{16\lambda(T_\phi - T_{\text{кип}})}{3\rho_v R_v}, \quad (4)$$

Интегрируя уравнение (4), при начальном условии ( $\tau = 0, d_k = d_{k0}$ ), определим время полного испарения капли

$$\tau_{\text{ис}} = \frac{\rho_v R_v d_k^2}{2\lambda(T_\phi - T_{\text{кип}})},$$

где  $\tau_{\text{ис}}$  – время полного испарения капли,  $\text{с}$ .

Рассмотрим случай начальной стадии развития пожара.

При горении твердых горючих материалов и горючих жидкостей очаг пожара может быть представлен в виде вертикального цилиндра (диаметром  $D$ ,  $\text{м}$ , и высотой  $h = 0,8D$ ,  $\text{м}$ ).

При испарении 1  $\text{мл}$  воды получается  $1/18$  моль водяного пара, моль газа при начальных условиях занимает  $22,4 \text{ дм}^3$ .

Тогда объем водяного пара составит  $1/18 \cdot 22,4 = 1,244 \text{ дм}^3 = 1244 \text{ мл}$ , а при среднеобъемной температуре  $\bar{T}$  в аварийном помещении  $\frac{1,244\bar{T}}{T_n}$ ,  $\text{дм}^3$ , где  $T_n = 273 \text{ К}$ .

Одна капля диаметром  $d_k$ ,  $\text{м}$ , дает при испарении объем пара  $V_\Pi^K$

$$V_\Pi^K = \frac{1,244 \cdot 10^{-3} T_\phi \pi d_k^3}{6T_n} = K_1 T_\phi d_k^3,$$

где  $K_1 = 2,38 \cdot 10^{-6}$  – размерный коэффициент,  $\text{К}^{-1}$ .

Для снижения концентрации кислорода с  $C_{\text{O}_2}^{\text{н}} = 21 \%$  до  $C_{\text{O}_2}^{\text{к}} = 16 \%$  в объеме пламени  $V_{\text{гор}}$ ,  $\text{м}^3$ , требуется объем пара  $V_\Pi$ ,  $\text{м}^3$ ,

$$V_\Pi = \frac{C_{\text{O}_2}^{\text{н}} - C_{\text{O}_2}^{\text{к}}}{100} V_{\text{гор}} = 0,05 V_{\text{гор}}.$$

Необходимое для этого количество капель

$$N_k = \frac{V_{\text{гор}}}{V_\Pi^K} = \frac{0,05 V_{\text{гор}}}{K_1 T_\phi d_k^3} = K_2 \frac{V_{\text{гор}}}{T_\phi d_k^3},$$

где  $K_2 = 2,1 \cdot 10^4$  – размерный коэффициент, К.

При принятой форме очага пожара, м,

$$V_{\text{гор}} = \frac{\pi h D^2}{4} = 0,2 \pi D^2.$$

Суммарный объем капель

$$V_{\Sigma K} = \frac{\pi d_K^3}{6} N_K = \frac{\pi d_K^3}{6} K_2 \frac{V_{\text{гор}}}{T_{\text{ф}} d_K^3} = \frac{K_3 D^3}{T_{\text{ф}}},$$

где  $K_3 = 11,43$  – размерный коэффициент, К.

Время жизни одной капли

$$\tau_K = \tau_H + \tau_{\text{ис}} = \frac{\rho_B c_B d_K}{3\lambda} \ln \left( \frac{\bar{T} - T_{K0}}{\bar{T} - T_{\text{кип}}} \right) + \frac{R_B \rho_B d_K^2}{2\lambda (T_{\text{ф}} - T_{\text{кип}})}.$$

Требуемая интенсивность подачи тонкораспыленной воды  $J$ , кг/(м<sup>3</sup>·с),

$$J = \frac{\rho_B V_{\Sigma K}}{V_{\text{гор}} \tau_K} = \frac{K_4 \rho_B}{0,2 \pi T_{\text{ф}} \tau_K},$$

где  $K_4 = 18,2 \cdot 10^3$  – размерный коэффициент, кг/(м<sup>3</sup>·с).

Интенсивность подачи тонкораспыленной воды с диаметром капли 150 мкм для ликвидации очага пожара древесины диаметром 2 м составляет 6,2 кг/(м<sup>3</sup>·с).

У разработанного НИИГД «Респиратор» ранцевого огнетушителя с параметрами, представленными в таблице, интенсивность подачи тонкораспыленной воды составляет 8,34 кг/(м<sup>3</sup>·с), что на 28 % превышает требуемую по расчету.

#### Технические параметры ранцевого огнетушителя для тушения низовых пожаров ОВР

| Параметр                                                                                                     | Норма       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| Огнетушащее вещество                                                                                         | вода        |
| Объем емкости, л                                                                                             | 15          |
| Продолжительность приведения в действие огнетушителя, с, не более                                            | 5           |
| Длина струи, м, не менее <ul style="list-style-type: none"> <li>• сплошной</li> <li>• распыленной</li> </ul> | 8<br>4      |
| Продолжительность непрерывной подачи, с, не менее                                                            | 360         |
| Габариты, мм                                                                                                 | 360x220x500 |
| Масса снаряженного огнетушителя, кг, не более                                                                | 22          |

Таким образом, флегматизация очага пожара водяным паром позволяет снизить интенсивность подачи воды или увеличить продолжительность работы огнетушителя на 28 %.

**Выводы.** На основе оценки времени нагревания и испарения капель тонкораспыленной воды при подлете к факелу пламени и пролете сквозь него на начальной стадии пожара в замкнутом помещении доказано, что высокая дисперсность капель обеспечивает интенсивное парообразование, приводящее к затуханию очага пожара.

Исследованные параметры тушения пожаров тонкораспыленной водой показывают, что механизм ликвидации очага пожара паром обеспечивает рациональную подачу воды и, соответственно, минимальное время тушения.

### Список литературы / References

1. Черемухин, В.С. Проблемы и решения обеспечения пожарной безопасности в регионах с ограниченными запасами воды / В.С. Черемухин, А.Е. Кучеров // Наука в исследованиях молодежи – 2017: мат-лы студ. науч. конф.: в 4 ч., Лесниково, 30 марта – 26 апреля 2017 г. – Курган, 2017. – С. 89 – 92.

Cheremukhin V.S., Kuchеров A.E. *Problemy i resheniya obespecheniya pozharnoi bezopasnosti v regionakh s ograničennymi zapasami vody* [Problems and solutions of fire safety maintenance in regions with limited water reserves]. *Nauka v issledovaniyakh molodyozhi – 2017: mat-ly stud. nauch. konf.: v 4 ch., Lesnikovo, 30 marta – 26 aprelya 2017 g.* [Science in young people's research – 2017: materials of student scientific conference, in 4 parts, Lesnikovo, March 30 – April 26, 2017]. Kurgan, 2017, pp. 89-92. (In Russian).

2. Андрияшкин, А.Ю. Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой / А.Ю. Андрияшкин, М.Т. Пелех // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2012. – № 1(21). – С. 64 – 70.

Andryushkin A.Yu., Pelekh M.T. *Effektivnost' pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody* [Effectiveness of fire extinguishment with water mist]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of risk management in technosphere*, 2012, no. 1(21), pp. 64-70. (In Russian).

3. Чагина, Л.В. Система пожаротушения тонкораспыленной водой как перспектива водного пожаротушения / Л.В. Чагина // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2020. – № 1. – С. 105 – 108.

Chagina L.V. *Sistema pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody kak perspektiva vodnogo pozharotusheniya* [Water mist fire extinguishing system as a prospect of water fire extinguishment]. *Sovremennye tekhnologii v stroitel'stve. Teoriya i praktika – Modern technologies in construction. Theory and practice*, 2020, no. 1, pp. 105-108. (In Russian).

4. Мешалкин, Е.А. Состояние и перспективы разработок изделий для тушения пожаров тонкораспыленной водой / Е.А. Мешалкин, П.М. Шевченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, № 1. – С. 68 – 75.

Meshalkin E.A., Shevchenko P.M. *Sostoyanie i perspektivy razrabotok izdelii dlya tusheniya pozharov tonkoraspylyonnoi vody* [Current state and trends of product developments for extinguishing the fires with water mist]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – Fire and explosion safety, 2008, vol. 17, no. 1, pp. 68-75. (In Russian).

5. Цариченко, С.Г. Некоторые вопросы пожаротушения тонкораспыленной водой / С.Г. Цариченко // Средства спасения. Противопожарная защита. – 2004. – № 10. – С. 203 – 205.

Tsarichenko S.G. *Nekotorye voprosy pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody* [Some issues of water mist fire extinguishment]. *Sredstva spaseniya. Protivopozharnaya zashhita* – Rescue equipment. Fire protection, 2004, no. 10, pp. 203-205. (In Russian).

6. Душкин, А.Л. Мобильные и стационарные системы пожаротушения тонкораспыленной водой / А.Л. Душкин, С.С. Янышев, А.В. Карпышев // Крупные пожары: предупреждение и тушение: материалы XVI науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПО, 2001. – Ч. 2. – С. 30 – 33.

Dushkin A.L., Yanyshhev S.S., Karpyshev A.V. *Mobil'nye i statsionarnye sistemy pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody* [Mobile and fixed systems of water mist fire extinguishment]. *Krupnye pozhary: preduprezhdenie i tushenie: mat-ly XVI nauch.-prakt. konf.* [Major fires: prevention and extinguishment: materials of the 16<sup>th</sup> scientific and practical conference]. Moscow, VNIIPPO Publ, 2001, Ch. 2, pp. 30-33. (In Russian).

7. Душкин, А.Л. Взаимодействие пламени горючей жидкости с тонкораспыленной водой / А.Л. Душкин, С.Е. Ловчинский // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 7. – С. 53 – 55.

Dushkin A.L., Lovchinskiy S.E. *Vzaimodeistvie plameni goryuchei zhidkosti s tonkoraspylyonnoi vody* [Interaction of flammable liquid flame with water mist]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – Fire and explosion safety, 2011, no. 7, pp. 53-55. (In Russian).

8. Особенности пожаротушения в замкнутом объеме тонкораспыленной водой / А.Л. Душкин, С.Е. Ловчинский, Н.Н. Рязанцев [и др.] // Пожаровзрывобезопасность. – 2017. – Т. 26, № 3. – С. 60 – 69.

Dushkin A.L., Lovchinskiy S.E., Ryazantsev N.N. [et al.]. *Osobennosti pozharotusheniya v zamknutom ob'yome tonkoraspylyonnoi vody* [Specifics of water mist fire extinguishment in confined volume]. *Pozharovzryvobezopasnost'* – Fire and explosion safety, 2017, vol. 26, no. 3, pp. 60-69. (In Russian).

9. Думилин, А.И. Параметры тушения пламени горючих жидкостей распыленной водой / А.И. Думилин // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 23, № 4. – С. 85 – 90.

Dumilin A.I. *Parametry tusheniya plameni goryuchikh zhidkostei raspylyonnoi vody* [Parameters of extinguishing a flame of flammable liquids with water mist]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2013, vol. 23, no. 4, pp. 85-90. (In Russian).

10. Андрюшкин, А.Ю. Эффективность пожаротушения тонкораспыленной водой / А.Ю. Андрюшкин, М.Т. Пелех // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2012. – № 3(23). – С. 37 – 45.

Andryushkin A.Yu., Pelekh M.T. *Effektivnost' pozharotusheniya tonkoraspylyonnoi vody* [Effectiveness of water mist fire extinguishment]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of risk management in technosphere*, 2012, no. 3(23), pp. 37-45. (In Russian).

11. Волков, Р.С. Численная оценка оптимальных размеров капель воды в условиях ее распыления средствами пожаротушения в помещениях / Р.С. Волков, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 5. – С. 74 – 78.

Volkov R.S., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A. *Chislennaya otsenka optimal'nykh razmerov kapel' vody v usloviyakh eyo raspyleniya sredstvami pozharotusheniya v pomeshheniyakh* [Quantative evaluation of optimum dimensions of water drops in conditions of spraying it with fire extinguishment means in premises]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2012, vol. 21, no. 5, pp. 74-78. (In Russian).

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

Vinogradov A.G. *Pogloshhenie teplovogo izlucheniya vodyanyimi zavesami. Ch. 2* [Thermal radiation adsorption by water screens. Part 2]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2013, vol. 22, no. 4, pp. 72-84. (In Russian).

13. Олышанский, В.П. Вопросы внешней баллистики огнетушащих веществ / В.П. Олышанский, О.А. Дубовик. – Харьков: Митець, 2005. – 236 с.

Ol'shanskii, V.P., Dubovik O.A. *Voprosy vneshnei ballistiki ognetushashhikh veshhestv* [Questions of external ballistics of fire-extinguishing agents]. Kharkov, Mytets' Publ., 2005, 236 p. (In Russian).

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

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

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

*Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*

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

**Denis Aleksandrovich Timoshenko**, commander; e-mail: denistimoshenko8293@gmail.com

*The 59<sup>th</sup> Firefighting and Rescue Department of the State Firefighting and Rescue Unit of the MChS DPR*

*287100, Tel'manovo town settlement, 171, ulitsa Lenina. Phone: (+38 071) 311-73-74*

## PARAMETERS OF EXTINGUISHING THE FIRES WITH WATER MIST AT THE INITIAL STAGE OF DEVELOPMENT

**Purpose.** Determination of the computed parameters of water mist fire-extinguishing means at the initial stage of development.

**Methods.** Analytical investigations of the parameters of heating and evaporation of the water mist drops in a seat of fire and of the phlegmatization of flaming zone by generated water vapor.

**Results.** There has been established the dependence of evaporation of the water drops and the oxygen replacement from the combustion zone by the generated vapor on the water mist delivery rate to the seat of fire.

**Scientific novelty.** The mechanism of the phlegmatization of the seat of fire by the water vapor generated by the water drops evaporation has been examined. The results confirm the experimental data on extinguishing the separate seats of fire with the water mist from knapsack tank fire extinguishers.

**Practical value.** The results may be applied for designing the water mist fire-extinguishing means and for development of the tactics of extinguishing the fires with the knapsack tank water fire extinguishers.

**Keywords:** *water mist; fire extinguishment; delivery rate; drop; period of heating; period of evaporation; phlegmatization.*

## II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.842.862

*Дмитрий Владимирович Захаров, зам. министра; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;  
Сергей Александрович Нека, директор департамента; e-mail: mchs-dnr@mail.ru  
Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР  
283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел.: (+38 062) 340-62-85  
Елена Ивановна Добрякова, науч. сотр.; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru  
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор»  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-44*

### ОБОСНОВАНИЕ НЕОБХОДИМОГО КОЛИЧЕСТВА ПОЖАРНО-СПАСАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ И МЕСТ ИХ ДИСЛОКАЦИИ

**Цель.** Обоснование необходимого количества пожарно-спасательных подразделений по Критериям образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах для своевременной ликвидации пожара на объекте.

**Методы.** Аналитические исследования проведены на основе Методики применения Критериев образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах и по результатам расчета необходимого количества пожарно-спасательных подразделений.

**Результаты.** На основании анализа приоритетности и взаимосвязи Критериев образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах систематизированы нормы численности пожарных подразделений в зависимости от пожарной опасности объектов защиты. Разработан алгоритм расчета необходимого количества пожарно-спасательных подразделений.

**Научная новизна.** Предложена математическая модель оценки соответствия времени прибытия пожарного автомобиля к объектам защиты Критериям образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах с учетом результатов мониторинга сети автомобильных дорог.

**Практическая значимость.** Полученные результаты предусмотрено применить для разработки программного обеспечения при оптимизации размещения пожарно-спасательных подразделений.

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

**Постановка проблемы.** С целью обеспечения безопасности личности, общества, государства от пожаров утверждены Критерии образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах (далее – Критерии) [1]. Очевидно, что на величину ущерба от пожаров оказывает влияние время прибытия пожарно-спасательных подразделений (частей) (далее – ПСЧ) к месту вызова, которое регламентировано Критериями для городской территории и для сельской местности. Нормативные показатели Критериев разработаны при математико-статистической обработке данных времени движения пожарной техники к месту вызова и определения длины пути с помощью геоинформационной системы мониторинга сети

автомобильных дорог. Разработанный алгоритм необходимого количества пожарно-спасательных подразделений с применением критериев времени прибытия, радиуса обслуживания и средней скорости движения пожарного автомобиля основан на иерархической приоритетности критерия времени прибытия пожарно-спасательного подразделения к месту вызова. В основу расчетов положена оценка возможности обеспечения нормативного времени прибытия к объектам защиты силами существующих пожарно-спасательных подразделений. Выполнены диагностика и анализ проблем организации тушения пожаров путем поиска несоответствия нормативным требованиям времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к объектам защиты, расположенным в их зоне ответственности.

**Анализ последних исследований.** В своей работе Н.Н. Брушлинский [2] подчеркивает важность проведения исследований, направленных на обеспечение поиска новых подходов к проведению расчетов необходимого количества ПСЧ и нормированию времени их прибытия. В рамках данной статьи рассмотрен новый метод расчета на основании Критериев, предложенных НИИГД «Респиратор» [1]. Авторы систематизировали нормируемые значения Критериев в зависимости от территориальной расположенности и пожарной опасности объектов защиты.

Соотношение числовых значений критериев по скорости движения, времени прибытия первого пожарно-спасательного подразделения к месту вызова и радиусу обслуживания приведено в таблице.

Значения критериев образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах

| Наименование объекта                                                                                                              | Радиус обслуживания, км | Время прибытия пожарно-спасательного подразделения, мин | Средняя скорость движения пожарного автомобиля, км/ч |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Числовые значения критериев для города                                                                                            |                         |                                                         |                                                      |
| Одноэтажная застройка                                                                                                             | ≤ 4                     | ≤ 10                                                    | 24                                                   |
| Здания промышленных предприятий категорий А, Б                                                                                    | ≤ 2                     | ≤ 10                                                    |                                                      |
| Здания промышленных предприятий категории В                                                                                       | ≤ 3                     | ≤ 10                                                    |                                                      |
| Здания промышленных предприятий категорий Г, Д                                                                                    | ≤ 4                     | ≤ 10                                                    |                                                      |
| Здания и сооружения промышленных предприятий IV, V степени огнестойкости с $S_{\text{застройки}} > 50\% S_{\text{застр. предпр}}$ | ≤ 1,8                   | ≤ 10                                                    |                                                      |
| Для остальной территории                                                                                                          | ≤ 3                     | ≤ 10                                                    |                                                      |
| Числовые значения критериев для населенных пунктов сельской местности                                                             |                         |                                                         |                                                      |
| Для всей территории                                                                                                               | ≤ 10                    | ≤ 20                                                    | 38                                                   |

**Изложение основного материала.** В исследованиях [4, 5] отмечено, что оценка соблюдения норматива по времени прибытия пожарной техники основана на предположении, что расчетная скорость пожарной техники не выше реально возможной скорости движения пожарного автомобиля. Это определение положено в основу расчета максимально допустимого расстояния от пожарной части до границ ее обслуживания.

При проведении исследования необходимого количества пожарно-спасательных подразделений для повышения экономической эффективности принимаемых решений установлено следующее:

- в основу расчета положено условие обязательной оценки возможности прибытия существующих ПСЧ от мест дислокации до места возникновения предполагаемого пожара на территории зоны ответственности за нормируемое Критериями время;

- система обеспечения пожарной безопасности населенных пунктов рассматривалась как совокупность оперативных ПСЧ и средств управления (без учета административных границ района) с целью оптимизации использования сил и средств, находящихся на балансе пожарно-спасательных подразделений.

В рамках проведения исследования числовых значений Критериев установлено, что невозможно выполнить расчет необходимого количества пожарно-спасательных подразделений без понимания различия в определении городской и сельской территории. Данное противоречие обозначено пределами применения различных числовых показателей радиуса обслуживания, скорости движения пожарного автомобиля и времени прибытия к месту вызова для города и сельской местности. В исследовании принято утверждение, что границы территориальных зон населенных пунктов «в городе» и «в сельской местности» необходимо определять административной принадлежностью.

Алгоритм определения необходимого количества пожарно-спасательных подразделений и мест дислокации приведен на рис. 1.

Графическую оценку соответствия критерию времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к объектам защиты выполняли путем нанесения:

- зоны ответственности пожарно-спасательного подразделения в виде окружности радиусом 3 км с центром в месте его дислокации;
- расчетной зоны ответственности пожарно-спасательного подразделения в виде ломаного многоугольника.

Границы расчетной зоны наносили путем соединения меток, поставленных на карте на расстоянии  $L_{\max}$ , км, от места дислокации ПСЧ при движении пожарного автомобиля по дорогам общего пользования к границам зоны ответственности, определяемой по формуле

$$L_{\max} = \frac{V}{60} \tau,$$

где  $V$  – нормируемая Критериями скорость движения пожарного автомобиля, км/ч;  
 $\tau$  – нормируемое Критериями время движения пожарного автомобиля, мин.



Рис. 1. Алгоритм определения необходимого количества пожарно-спасательных подразделений и мест их дислокации:

ПСЧ – пожарно-спасательное подразделение (часть);

ОО – участок с отрицательной оценкой соответствия Критериям

Следовательно, для городской территории  $L_{\max} = (24/60) 10 = 4$  км.

На основании результатов проведения графической оценки времени прибытия пожарно-спасательных подразделений выделили участки территории зоны их ответственности, время прибытия пожарно-спасательных подразделений к расположенным на ней объектам защиты превышает нормативное. Наличие участков территории с отрицательной оценкой соответствия Критериям времени прибытия пожарно-спасательных подразделений (далее – участок с ОО) свидетельствует о проблемах в организации тушения пожаров, устранение которых возможно путем расчета необходимого количества дополнительных пожарно-спасательных подразделений.

Пример нанесения зоны ответственности в виде окружности радиусом 3 км с центром в месте дислокации пожарно-спасательного подразделения и расчетной зоны его ответственности приведен на рис. 2.

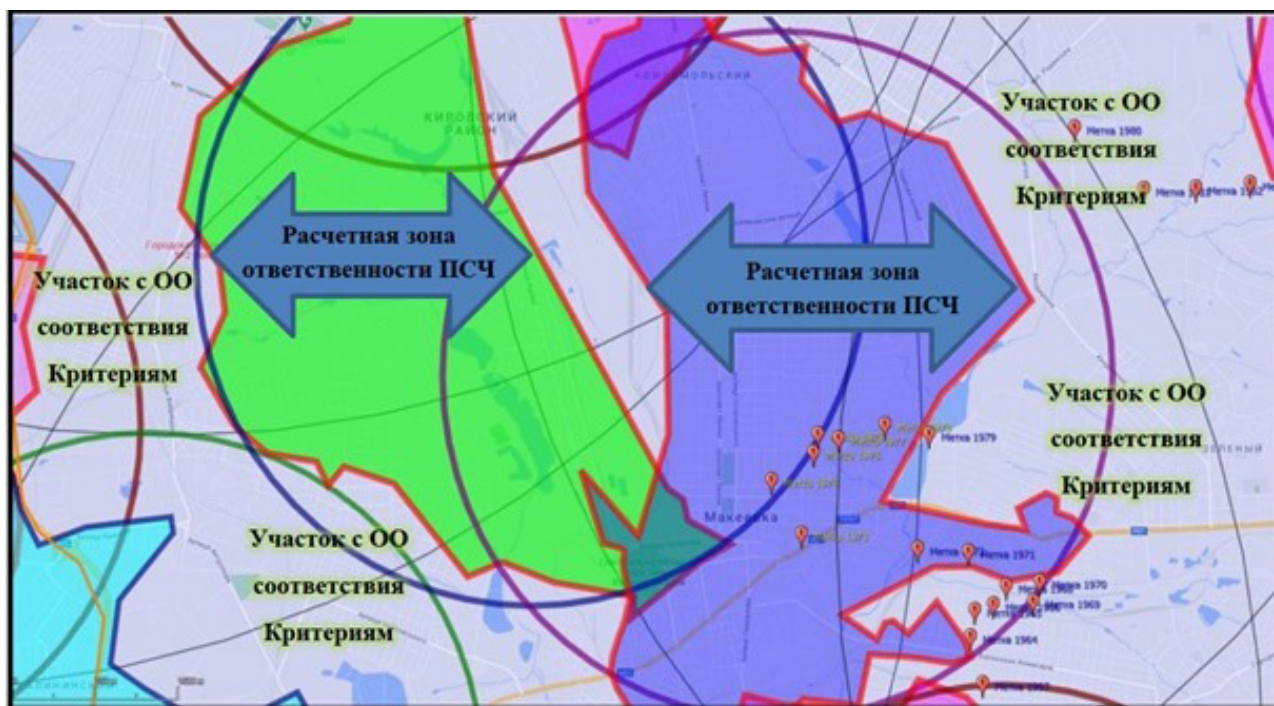


Рис. 2. Пример нанесения зоны ответственности в виде окружности радиусом 3 км и расчетной зоны ответственности РСЧ:  
 участок с ОО соответствия Критериям – участок с отрицательной оценкой соответствия Критериям времени прибытия РСЧ

Для уточнения полученных результатов выполнены проверочные расчеты времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к объектам защиты.

При движении пожарного автомобиля к месту вызова по городской территории и по территории сельской местности расчет времени прибытия ( $\tau_{\text{общ},i}$ , мин) пожарного автомобиля от мест дислокации существующих пожарно-спасательных подразделений к объектам защиты в зоне ответственности пожарно-спасательного подразделения выполняли по формуле

$$\tau_{\text{общ},i} = \tau_{\text{г},i} + \tau_{\text{с},i} = \frac{L_{\text{г},i}}{V_{\text{ср},\text{г}}} 60 + \frac{L_{\text{с},i}}{V_{\text{ср},\text{с}}} 60,$$

где  $\tau_{\text{г},i}$ ,  $\tau_{\text{с},i}$  – время, необходимое для прибытия ближайшего пожарно-спасательного подразделения к  $i$ -му объекту защиты на территории города и сельской местности соответственно, мин;  
 $L_{\text{г},i}$ ,  $L_{\text{с},i}$  – длина оптимального пути следования от места дислокации существующего пожарно-спасательного подразделения к объектам защиты на территории города и сельской местности соответственно, км;

$V_{\text{ср},\text{г}} = 24$  км/ч – критерий средней скорости движения по городу;

$V_{\text{ср},\text{с}} = 38$  км/ч – критерий средней скорости движения по сельской местности.

Длину пути следования ( $L_{\text{общ},i} = L_{\text{г},i} + L_{\text{с},i}$ , км) от места дислокации существующего ПСП до  $i$ -го объекта защиты определяли с помощью геоинформационной системы мониторинга сети автомобильных дорог.

В процессе исследований разработаны и применены модели графической и расчетной оценки для определения оптимального количества пожарно-спасательных подразделений, позволяющие выполнить расчеты различной глубины проработки информации в зависимости от имеющегося для принятия управленческих решений запаса времени, а именно:

- экспресс-расчет необходимого количества ПСЧ, основанный на графической оценке количества нанесенных на карте окружностей радиусом 3 км (для городской территории) или 10 км (для сельской местности), позволяет получить результат за относительно короткое по отношению к нижеприведенным вариантам расчета время;

- расчет необходимого количества ПСЧ, основанный на нанесении на карту расчетных зон ответственности ПСЧ. Метод отличается более полной информативностью и позволяет точно выделять на карте территории с отрицательной оценкой соответствия Критериям времени прибытия пожарно-спасательных подразделений;

- проверочный расчет времени прибытия ПСЧ к границам расчетной зоны их ответственности повышает степень достоверности полученных результатов.

Для оценки времени прибытия пожарной техники к объектам защиты:

- на территории городов выполнены проверочные расчеты времени прибытия ПСЧ к месту предполагаемого пожара на объектах защиты на улицах городов (согласно предоставленным спискам улиц);

- на территории сельской местности выполнены проверочные расчеты времени прибытия ПСЧ к месту предполагаемого пожара для каждого населенного пункта.

Обобщенная оценка соответствия Критериям времени прибытия ПСЧ определена на основании результатов графической оценки и расчетов времени прибытия пожарной техники.

Положительная оценка соблюдения критерия времени прибытия первого ПСЧ к месту выезда на территории городов и сельской местности предполагала соблюдение условий  $\tau_{ri} \leq 10$  мин и  $\tau_{ri} \leq 20$  мин соответственно. Объект защиты включают в зону обслуживания данного ПСЧ.

При соблюдении условия  $\tau_{ri} > 10$  мин и  $\tau_{ri} > 20$  мин делали заключение о невозможности обеспечения требуемой степени пожарной защиты данных территорий силами существующих ПСЧ и о необходимости образования дополнительных ПСЧ. В виде исключения могла быть дана положительная оценка в случае, когда время прибытия ПСЧ к единичным объектам защиты от пожаров, расположенным на тупиковых улицах у границ территории города, превышало критерий до 5 мин.

Пример результатов оценки соответствия критериям времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к объектам защиты, расположенным на улицах города, приведен на рис. 3.

| №<br>п/п | ПСЧ № | Итоги оценки соответствия Критериям времени прибытия ПСЧ к улицам г. : N |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         | ИТОГО           |         |         |         |
|----------|-------|--------------------------------------------------------------------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|-----------------|---------|---------|---------|
|          |       | Наименование районов г.                                                  |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         |         |
|          |       | Р.м. 1                                                                   |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         |         |
|          |       | Количество улиц                                                          |         |         | Количество улиц |         |         | Количество улиц |         |         | Количество улиц |         |         | Количество улиц |         |         | Количество улиц |         |         | 9%      |
|          |       | Всего                                                                    | с<br>ПО | с<br>ОО | Всего           | с<br>ПО | с<br>ОО | Всего           | с<br>ПО | с<br>ОО | Всего           | с<br>ПО | с<br>ОО | Всего           | с<br>ПО | с<br>ОО | Всего           | с<br>ПО | с<br>ОО | с<br>ОО |
| 1        | ПСЧ   |                                                                          |         |         |                 |         | 221     | 152             | 69      |         |                 |         |         |                 |         | 221     | 152             | 69      | 31      |         |
| 2        | ПСЧ   |                                                                          |         |         | 85              | 30      | 55      |                 |         |         | 100             | 90      | 10      |                 |         | 185     | 120             | 65      | 35      |         |
| 3        | ПСЧ   |                                                                          |         |         | 249             | 249     |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         | 249     | 249             |         | 0       |         |
| 4        | ПСЧ   | 19                                                                       | 19      |         |                 |         |         |                 |         | 14      | 14              |         |         |                 |         | 33      | 33              |         | 0       |         |
| 5        | ПСЧ   |                                                                          |         |         |                 |         | 345     | 195             | 150     |         |                 |         |         |                 |         | 345     | 195             | 150     | 44      |         |
| 6        | ПСЧ   |                                                                          |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         | 235     | 195             | 40      | 235     | 195             | 40      | 17      |         |
| 7        | ПСЧ   | 3                                                                        | 2       | 1       | 78              | 63      | 15      | 35              | 8       | 27      | 39              | 6       | 33      |                 |         | 155     | 79              | 76      | 49      |         |
| 8        | ПСЧ   |                                                                          |         |         |                 |         |         |                 |         |         |                 |         |         | 65              | 65      | 65      | 65              |         | 0       |         |
|          | Итого | 22                                                                       | 21      | 1       | 412             | 342     | 70      | 601             | 355     | 246     | 153             | 110     | 43      | 300             | 260     | 40      | 1488            | 1088    | 400     |         |

Рис. 3. Обобщенная оценка времени прибытия пожарно-спасательных подразделений к объектам защиты на улицах города:  
участок с ПО соответствия Критериям – участок с положительной оценкой соответствия Критериям времени прибытия ПСЧ

Обоснование необходимого количества пожарно-спасательных подразделений проведено методом критического анализа и оценки при совокупности фактов:

- возможности прибытия существующих ПСЧ к месту вызова к объектам защиты на территории Донецкой Народной Республики в нормативное время;
- проблем в организации тушения пожаров через поиск несоответствия нормируемых показателей Критериям;
- мест возможного размещения дополнительных ПСЧ для обеспечения критерия времени прибытия к месту вызова;
- эффективности выбранной конфигурации территориальных границ выезда дополнительных ПСЧ с учетом интенсивности выездов (на основе анализа выездов на пожары).

**Выводы.** В качестве перспективы развития исследования в направлении повышения уровня защиты объектов от пожаров на территории Донецкой Народной Республики целесообразно на основании результатов графической оценки и проверочного расчета времени прибытия существующих ПСЧ к объектам защиты разработать блок программного обеспечения с целью использования компьютерных технологий при принятии управленческих решений по организации системы обеспечения пожарной безопасности.

#### Список литературы / References

1. Критерии образования государственных пожарно-спасательных подразделений в административно-территориальных единицах: [утверждены

Постановлением Правительства Донецкой Народной Республики от 22.11.2019 № 37-11].

*Kriterii obrazovaniya gosudarstvennykh pozharno-spasatel'nykh podrazdelenii v administrativno-territorial'nykh edinitsakh: (utverzhdenu Postanovleniem Pravitel'stva Donetskoi Narodnoi Respubliki ot 22.11.2019 № 37-11)* [The Criteria of the State Fire and Rescue Subdivisions Formation in the Administrative and Territorial Divisions: (as amended by the Decree of the Donetsk People's Republic Government of November 22, 2019 № 37-11)]. (In Russian).

2. Брушлинский, Н.Н. О нормировании времени прибытия пожарных подразделений к месту пожара / Н.Н. Брушлинский, О.В. Соколов // Пожарная безопасность. – 2011. – Т. 20, № 1. – С. 42 – 48.

Brushlinskii N.N., Sokolov O.V. *O normirovanii vremeni pribytiya pozharnykh podrazdelenii k mestu pozhara* [On standardization of time of fire subdivisions arrival to location of fire]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2011, vol. 20, no. 1, pp. 42-48. (In Russian).

3. Положение о Государственной пожарной охране: [утверждено Постановлением Правительства Донецкой Народной Республики от 22.11.2019 № 37-11].

*Polozhenie o Gosudarstvennoi pozharnoi okhrane: (utverzhdenu Postanovleniem Pravitel'stva Donetskoi Narodnoi Respubliki ot 22.11.2019 № 37-11)* [The Regulation on the State Fire Service: (as amended by the Decree of the Donetsk People's Republic Government of November 22, 2019 № 37-11)]. (In Russian).

4. Костямин, Д.И. Обоснование количества пожарных частей / Д.И. Костямин, Д.В. Мотов, Е.И. Добрякова // Междунар. науч.-практ. конф. «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности» (18–19.10.2018): сб. тезисов докладов. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018.

Kostyamin D.I., Motov D.V., Dobryakova Ye.I. *Obosnovanie kolichestva pozharnykh chastei* [Substantiation of quantity of fire subdivisions]. *Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Istoricheskii opyt, sovremennyye problemy i perspektivy obrazovatel'noi i nauchnoi deyatel'nosti v oblasti obespecheniya pozharnoi bezopasnosti" (18-19.10.2018): sb. tezisov dokladov* [The international scientific and practical conference "Historical experience, nowadays problems and prospects of educational and scientific activity in the field of maintaining the fire safety": collection of theses (October 18-19, 2018)]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Press, 2018. (In Russian).

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

Kostyamin D.I., Dobryakova Ye.I. *Bazovye pokazateli dlya opredeleniya mest dislokatsii PSCh* [Core indicators for determination of locations of fire and rescue branches]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific

bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 1(56), pp. 17-24. (In Russian).

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 26.01.2022*

**Dmitry Vladimirovich Zakharov**, deputy minister; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;  
**Sergey Aleksandrovich Neka**, head of department; e-mail: mchs-dnr@mail.ru  
*The Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination  
of Consequences of Natural Disasters of the Donetsk People's Republic  
283050, Donetsk, 60, ulitsa Shhorsa. Phone: (+38 062) 340-62-85*  
**Yelena Ivanovna Dobryakova**, scientific associate; e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru  
*The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,  
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-44*

## **SUBSTANTIATION OF REQUIRED QUANTITY OF FIRE AND RESCUE SUBDIVISIONS AND PLACES OF THEIR LOCATION**

**Purpose.** Substantiation of the required quantity of the fire and rescue subdivisions according to the Criteria for Formation of the State Fire and Rescue Subdivisions in the Administrative and Territorial Divisions for elimination of fire in a facility in a timely manner.

**Methods.** Analytical investigations have been conducted on the basis of the Methodology of application of the Criteria for Formation of the State Fire and Rescue Subdivisions in the Administrative and Territorial Divisions and according to the results of calculation of the required quantity of the fire and rescue subdivisions.

**Results.** On the basis of the analysis of priority and interrelationship of the Criteria for Formation of the State Fire and Rescue Subdivisions in the Administrative and Territorial Divisions the manpower number standards have been systematized according to the fire hazard of objects of protection. The algorithm for calculation of the required quantity of the fire and rescue subdivisions has been developed.

**Scientific novelty.** The mathematical model for assessing the compliance of the time of fire truck arrival to the objects under protection with the Criteria of Formation of the State Fire and Rescue Subdivisions in the Administrative and Territorial Divisions has been suggested factoring in the results of the road network monitoring.

**Practical value.** The obtained results are to be applied in development of a software for optimization of deployment of the fire and rescue subdivisions.

**Keywords:** *fire; arrival time; fire and rescue subdivision; driving speed; formation criteria.*

**УДК 622.867.1:614.842.862**

*Александр Михайлович Симонов, нач. отд.; e-mail: avrstla@mail.ru;*  
*Александр Александрович Всякий, науч. сотр.; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru;*  
*Александр Викторович Мавроди, науч. сотр.; e-mail: mavrodi-av@mail.ru;*  
*Александр Владиславович Агарков, вед. инж.; e-mail: aleksander\_agarkov@mail.ru*  
*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,*  
*пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР*  
*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-34*

## **МЕТОДИКА РАСЧЕТА ШТАТНОЙ ЧИСЛЕННОСТИ ОПЕРАТИВНОЙ И ОПЕРАТИВНО-МЕДИЦИНСКОЙ СЛУЖБ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНЫХ ПОДРАЗДЕЛЕНИЙ**

**Цель.** Разработка методики расчета штатной численности оперативной и оперативно-медицинской служб горноспасательных подразделений.

**Методы.** При проведении исследований использованы аналитический, статистический, теоретический и другие экономико-математические методы.

**Результаты.** Методика позволит рассчитывать оптимальное количество горноспасательных подразделений, а также штатную численность оперативной и оперативно-медицинской служб для обслуживания объектов.

**Научная новизна.** Впервые предложена методика расчета штатной численности оперативной и оперативно-медицинской служб горноспасательных подразделений, учитывающая такие критерии, как группы опасности обслуживаемых объектов по задействованию отделений при вызове на аварию в первоначальный период, выполнение дополнительных работ по запросам органов исполнительной власти, задействование сил и средств по обеспечению жизнедеятельности социально значимых объектов, разделение территории обслуживаемых объектов на агломерации и др.

**Практическая значимость.** Методика расчета штатной численности оперативной и оперативно-медицинской служб, входящих в состав горноспасательных подразделений, легла в основу нормативного документа для расчета количества горноспасательных подразделений по обслуживанию объектов.

**Ключевые слова:** *горноспасательная служба; обслуживание объектов; оптимальная штатная численность; критерии и методы определения; оперативная и оперативно-медицинская службы; методика расчета.*

**Постановка проблемы.** При пересмотре структуры подразделений горноспасательной службы с целью их упорядочения и приведения штатной численности к оптимальным значениям для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера на горных предприятиях актуальность приобретает разработка методики расчета численности работников оперативной и оперативно-медицинской служб горноспасательных подразделений.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В ходе проведенного анализа нормативной правовой документации (например, постановление Правительства Российской Федерации от 27.04.2018 № 517, приказ Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям

и ликвидации последствий стихийных бедствий от 29.11.2012 № 707 и др.), связанной с определением необходимого количества горноспасательных подразделений для обслуживания промышленных объектов, установлено следующее:

- действующие методики расчета подразделений горноспасательной службы не удовлетворяют предъявляемым требованиям в современных условиях Донецкой Народной Республики;
- критерии дислокации взводов горноспасательной службы Российской Федерации существенно отличаются от условий дислокации горноспасательных подразделений Донецкой Народной Республики;
- расчет количества отделений выполняют с учетом фактической аварийности на обслуживаемых объектах за последние десять лет, среднегодовой нагрузки на отделение по объему выполнения аварийных и технических работ, а также удаленности объектов от подразделений соседних отрядов.

В связи с неравномерным распределением нагрузки на горноспасательные подразделения одним из эффективных решений может стать разделение территории Донецкой Народной Республики на агломерации.

Агломерация как территориальное размещение населенных пунктов, объединенных в сложную многокомпонентную динамическую систему с интенсивными производственными и транспортными связями [1, 2], состоит из одной или нескольких площадей, на территории которых объекты должны обслуживаться одним горноспасательным отрядом. Количество горноспасательных отрядов, входящих в состав горноспасательной службы, зависит от количества обслуживаемых объектов, степени их промышленной опасности и других факторов, в том числе связанных с выполнением дополнительных работ и обслуживанием специализированной горноспасательной техники.

На основании научно-технического анализа и проведенных исследований объективные критерии, которые должны быть учтены при разработке Методики расчета штатной численности оперативной и оперативно-медицинской служб горноспасательных подразделений, следующие:

- группы опасности обслуживаемых объектов по задействованию отделений при вызове на аварию в первоначальный период;
- выполнение работ по запросам органов исполнительной власти (администраций, прокуратуры, полиции) на территории Донецкой Народной Республики, в том числе привлечение на объекты, ведущие горные работы, при этом не состоящие на обслуживании подразделений горноспасательной службы;
- оказание работниками реанимационно-противошоковых групп экстренной и неотложной медицинской помощи пострадавшим при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций, включая их медицинскую эвакуацию в учреждения здравоохранения;

- задействование сил и средств по обеспечению жизнедеятельности социально значимых объектов;

- выезд и выполнение работ на территории промышленных объектов, горных отводов, жилых домов и придомовых строений, где происходят нарушения земной поверхности (провалы), выделения вредных газов [3, 4].

**Цель исследования** – разработка методики расчета штатной численности оперативной и оперативно-медицинской служб горноспасательных подразделений.

**Материалы и результаты исследований.** Согласно проведенным исследованиям, определение штатной (списочной) численности работников горноспасательных подразделений, которая позволяет круглосуточно, эффективно и качественно выполнять конкретную работу с условием обеспечения режимов труда и отдыха в соответствии с действующим законодательством Донецкой Народной Республики, необходимо осуществлять по каждой должности и профессии отдельно, исходя из явочной численности работников с учетом коэффициента списочного состава

$$Ч_{ш} = Ч_{я} \cdot K_{сп},$$

где  $Ч_{ш}$  – штатная (списочная) численность работников, чел.;

$Ч_{я}$  – явочная численность работников, чел.;

$K_{сп}$  – коэффициент списочного состава.

Результат расчета штатной (списочной) численности работников следует округлять до целого числа.

Определение явочной численности работников при организации круглосуточного дежурства предлагаем рассчитывать по формуле

$$Ч_{я} = \frac{H_{ф} \cdot C}{H_{р}} Ч_{с},$$

где  $H_{ф}$  – номинальный фонд рабочего времени (при круглосуточном дежурстве равен количеству календарных дней в году), дн.;

$C$  – количество часов в сутки, 24 ч;

$H_{р}$  – норма продолжительности рабочего времени на год в часах при 40-часовой рабочей неделе, ч;

$Ч_{с}$  – количество работников в одну смену, чел.

Результат расчета явочной численности работников при организации круглосуточного дежурства рекомендуется округлять до целого числа.

Коэффициент списочного состава  $K_{сп}$  следует определять по формуле

$$K_{сп} = \frac{\Phi_{н}}{\Phi_{р}},$$

где  $\Phi_n$  – номинальный фонд рабочего времени, равный количеству рабочих дней в году, дн.;

$\Phi_p$  – планируемое количество рабочих дней для отдельной должности, которое определяют количеством рабочих дней в году (без учета дней временной нетрудоспособности – 10 календарных дней, отпусков, специальных тренировок, обучения и др.), дн.

Для перевода календарных дней в рабочие необходимо количество календарных дней в году умножить на пять и разделить на семь.

Расчет количества отделений для обслуживания одной агломерации следует выполнять для первоначального момента ликвидации аварии в соответствии с планами мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на обслуживаемых объектах (продолжительностью до 6 ч) [5]. При этом среднее количество отделений на один обслуживаемый объект в пределах одной агломерации предлагаем рассчитывать по формуле

$$N_{\text{ср.отд}} = \frac{\sum_{i=1}^n N_i}{K_{\text{объект}}},$$

где  $N_{\text{ср.отд}}$  – среднее количество отделений на один обслуживаемый объект в пределах одной агломерации, ед.;

$N_i$  – количество отделений при вызове на аварию в первоначальный момент зависит от группы опасности обслуживаемых объектов. Необходимо принимать равным для:

I группы – действующие горные предприятия с протяженностью горных выработок более 50 км, опасные по газу третьей и выше категории ( $N_i = 8$  ед.);

II группы – действующие горные предприятия с протяженностью горных выработок до 50 км, не опасные и опасные по газу I и II категории ( $N_i = 6$  ед.);

III группы – углеперерабатывающие предприятия, водоотливные комплексы ликвидируемых шахт ( $N_i = 5$  ед.);

IV группы – малые угледобывающие предприятия, сортировочные площадки и объекты, не вошедшие в I – III группы обслуживаемых объектов ( $N_i = 2$  ед.).

В случае если действующее горное предприятие относится к категории «опасные по газу третьей и выше категории», а протяженность горных выработок составляет до 50 км, то предприятие необходимо относить к I группе (опасность по газовому фактору является приоритетной).

$K_{\text{объект}}$  – суммарное количество обслуживаемых объектов, которые расположены в пределах одной агломерации, ед.

Результат расчета следует округлять до целого числа в большую сторону.

Общее количество отделений для выполнения аварийно-спасательных работ на обслуживаемых объектах с учетом круглосуточного дежурства при явочной численности работников необходимо рассчитывать следующим образом:

$$N_{\text{деж}} = N_{\text{ср.отд}} \cdot N_{\text{смен}},$$

где  $N_{\text{деж}}$  – общее количество отделений для выполнения аварийно-спасательных работ на обслуживаемых объектах с учетом круглосуточного дежурства, ед.;

$N_{\text{смен}}$  – количество смен, необходимых для круглосуточного дежурства отделений (следует принимать равным четырем сменам), ед.

Основное количество отделений для выполнения аварийно-спасательных работ на обслуживаемых объектах с учетом круглосуточного дежурства при штатной (списочной) численности работников необходимо рассчитывать по формуле

$$N_{\text{шт}} = N_{\text{деж}} \cdot \text{Ч}_{\text{я.от}} \cdot K_{\text{сп}},$$

где  $N_{\text{шт}}$  – штатная (списочная) численность работников отделений, ед.;

$\text{Ч}_{\text{я.от}}$  – явочная численность работников в одном отделении (один командир отделения и пять респираторщиков), ед.

Количество отделений для выполнения аварийно-спасательных работ на обслуживаемых объектах с учетом круглосуточного дежурства необходимо рассчитывать следующим образом:

$$N_{\text{осн}} = \frac{N_{\text{шт}}}{\text{Ч}_{\text{шт.от}}},$$

где  $N_{\text{осн}}$  – основное количество отделений для выполнения аварийно-спасательных работ на обслуживаемых объектах, ед.;

$\text{Ч}_{\text{шт.от}}$  – численность работников в одном отделении для выполнения аварийно-спасательных работ (один командир отделения и пять респираторщиков), ед.

На современном этапе немаловажен расчет среднего количества отделений для выполнения дополнительных работ в пределах одной агломерации, который предлагаем производить по формуле

$$N_{\text{доп}} = \frac{N_{\text{сумм}}}{N_{\text{вызов}}} + \left( \frac{\text{Ч}_{\text{др}}}{\text{Ч}_{\text{шт.от}}} / L \right),$$

где  $N_{\text{доп}}$  – среднее количество отделений для выполнения дополнительных работ в пределах одной агломерации, ед.;

$N_{\text{сумм}}$  – суммарное количество отделений, задействованных на выполнение дополнительных работ (согласно учету вызовов за последние пять лет в пределах одной агломерации), ед.;

$N_{\text{вызов}}$  – общее количество вызовов на выполнение дополнительных работ (согласно учету вызовов за последние пять лет в пределах одной агломерации), ед.;

$\text{Ч}_{\text{др}}$  – численность работников (водитель автомобиля, заместитель командира отряда, помощник командира отряда, командир взвода, помощник командира взвода), участвующих в выполнении дополнительных работ (согласно учету вызовов за последние пять лет в пределах одной агломерации), ед.;

$L$  – количество лет (согласно учету вызовов за последние пять лет в пределах одной агломерации), ед.

Общее количество отделений для выполнения аварийно-спасательных и дополнительных работ, а также для задействования специализированной горноспасательной техники (генераторов инертного газа, криогенной техники, высокопроизводительных пеногенераторов и т.п.) в пределах одной агломерации следует рассчитывать по формуле

$$N_{\text{общ}} = N_{\text{осн}} + N_{\text{доп}} + N_{\text{спец}},$$

где  $N_{\text{общ}}$  – общее количество отделений для выполнения аварийно-спасательных и дополнительных работ в пределах одной агломерации, ед.;

$N_{\text{спец}}$  – количество отделений для обслуживания специализированной горноспасательной техники, ед. При наличии специализированной горноспасательной техники количество отделений – 1 ед.

Результат расчета общего количества отделений для выполнения аварийно-спасательных и дополнительных работ, а также для задействования специализированной горноспасательной техники в пределах одной агломерации необходимо округлять до целого числа в большую сторону.

Общее количество взводов для обслуживания объектов в пределах одной агломерации следует рассчитывать по формуле

$$N_{\text{взв}} = \frac{N_{\text{общ}}}{N_{\text{отд}}},$$

где  $N_{\text{взв}}$  – общее количество взводов для обслуживания объектов в пределах одной агломерации, ед.;

$N_{\text{отд}}$  – минимальное количество отделений в одном взводе – 6 ед.

Примечание к предложенной методике: при расчете общего количества взводов для обслуживания объектов в пределах одной агломерации необходимо выделить целое число в полученном результате, которое и будет общим количеством взводов. Остаток числа из полученного результата рекомендовано умножить на шесть, полученным числом отделений следует доукомплектовать взводы, которые обслуживают объекты, относящиеся к группам с наибольшей опасностью.

### **Выводы и перспективы дальнейших исследований.**

Методика расчета оптимальной штатной численности оперативной и оперативно-медицинской служб горноспасательных подразделений учитывает оптимальную численность работников, поддержание постоянной круглосуточной готовности к немедленному выезду необходимого количества отделений и лиц командного состава на обслуживаемые объекты для спасения людей и ликвидации последствий аварий, соблюдение для каждого работника месячной нормы рабочего времени, а также соблюдение в аварийный и межаварийный периоды режимов труда и отдыха.

Перспективные направления дальнейших исследований – разработка методик расчета оптимальной штатной численности работников других структурных подразделений, подконтрольных Министерству по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий.

### **Список литературы / References**

1. Малоян, Г.А. От города к агломерации / Г.А. Малоян // Academia. Архитектура и строительство: ежекварт. журн. – М.: Российская академия архитектуры и строительных наук, 2010. – № 1. – С. 47 – 53.

Maloyan G.A. *Ot goroda k aglomeratsii* [From town to agglomeration]. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo: ezhekvert. zhurn.* [Academia. Architecture and construction: quarterly journal]. Moscow, Rossiiskaya akademiya arkhitektury i stroitel'nykh nauk Press, 2010, no. 1, pp. 47-53. (In Russian).

2. Гвоздева, М.А. Подходы к определению агломерации / М.А. Гвоздева, М.В. Казакова, Е.А. Поспелова // Российское предпринимательство: науч.-практ. журн. – М.: Креативная экономика, 2016. – Т. 17. – № 24. – С. 3505 – 3514.

Gvozdeva M.A., Kazakova M.V., Pospelova E.A. *Podkhody k opredeleniyu aglomeratsii* [Approaches to definition of agglomeration]. *Rossiiskoe predprinimatel'stvo: nauch.-prakt. zhurn.* [Russian entrepreneurship: scientific-practical journal]. Moscow, Kreativnaya ekonomika Publ., 2016, vol. 17, no. 24, pp. 3505-3514. (In Russian).

3. О мониторинге и контроле за выделением вредных газов на земную поверхность, в здания и сооружения подразделениями горноспасательной службы при ликвидации и консервации угольных шахт / А.М. Симонов,

Н.В. Карнаух, В.В. Захлебін, А.В. Агарков // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: науч. журн. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2021. – № 2(9). – С. 323 – 332.

Simonov A.M., Karnaukh N.V., Zakhlebin V.V., Agarkov A.V. *O monitoringe i kontrole za vydeleniem vrednykh gazov na zemnuyu poverkhnost', v zdaniya i sooruzheniya podrazdeleniyami gornospasatel'noi sluzhby pri likvidatsii i konservatsii ugol'nykh shakht* [On monitoring and controlling the release of noxious gases on ground surface, in buildings and constructions by the mine-rescue service subdivisions during liquidation and conservation of coal mines]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauch. zhurn.* [Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk, GOUVPO "Akademiya grazhdanskoï zashhity" MChS DNR Press, 2021, no. 2(9), pp. 323-332. (In Russian).

4. Симонов, А.М. Мониторинг газовой обстановки на горных отводах шахт, в зданиях и сооружениях / А.М. Симонов, Н.В. Карнаух, А.В. Агарков // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 4(58). – С. 65 – 76.

Simonov A.M., Karnaukh N.V., Agarkov A.V. *Monitoring gazovoi obstanovki na gornykh otvodakh shakht, v zdaniyakh i sooruzheniyakh* [Monitoring of gas condition at claims of coal mines, in buildings and constructions]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2021, no. 4(58), pp. 65-76. (In Russian).

5. Федунец, Н.И. Выбор оптимальной структуры организации объектов в системе плана ликвидации аварий / Н.И. Федунец, С.С. Кубрин, С.Г. Чудинов // Горный информационно-аналитический бюллетень: науч.-техн. журн. – М.: Горная книга, 2005. – № 6. – С. 171 – 173.

Fedunets N.I., Kubrin S.S., Chudinov S.G. *Vybor optimal'noi struktury organizatsii ob'ektov v sisteme plana likvidatsii avarii* [Selection of optimum structure of objects organization in emergency response plan system]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten': nauch.-tekhn. zhurn.* – *Mining informational and analytical bulletin: scientific-technical journal*, Moscow, Gornaya kniga Publ., 2005, no. 6, pp. 171-173. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым  
Дата поступления рукописи 14.01.2022

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

*Aleksandr Aleksandrovich Vsyakiy, scientific associate; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru;*

*Aleksandr Viktorovich Mavrodi, scientific associate; e-mail: mavrodi-av@mail.ru;*

*Aleksandr Vladislavovich Agarkov, advanced engineer; e-mail: aleksander\_agarkov@mail.ru*

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

*Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*

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

## **METHODOLOGY FOR CALCULATING MANPOWER OF OPERATIONAL AND OPERATIONAL-MEDICAL SERVICES OF MINE-RESCUE SUBDIVISIONS**

**Purpose.** Development of the methodology for calculating the manpower of the operational and the operational-medical services of the mine-rescue subdivisions.

**Methods.** The analytical, statistical, theoretical and other economical and mathematical methods have been applied during conduction of the investigations.

**Results.** The methodology will make it possible to calculate the optimal number of the mine-rescue subdivisions as well as the manpower of the operational and the operational-medical services for maintaining the facilities.

**Scientific novelty.** The novel methodology has been proposed for calculating the manpower numbers of the operational and the operational-medical services of the mine-rescue subdivisions that factors in such criteria as the hazard class of the maintained facilities according to the number of subdivisions involved in the initial period of the emergency response, the execution of additional works at the instance of the executive power bodies, the employment of the forces and equipment for life support of the socially significant facilities, the segregation of the territory of maintained facilities into agglomerations etc.

**Practical value.** The methodology for calculating the manpower of the operational and the operational-medical services being included in the mine-rescue subdivisions has laid the foundation for the regulatory document for calculating the number of the mine-rescue subdivisions for maintaining the facilities.

**Keywords:** *mine-rescue service; maintenance of facilities; optimum manpower number; criteria and methods of determination; operational and operational-medical service; methodology for calculating.*

**УДК 614.841.332:620.197.6***Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru;**Алексей Андреевич Козлитин, нач. отд.; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;**Игорь Николаевич Непочатых, науч. сотр.; e-mail: tamdoka@mail.ru**Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-55*

## **ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ФАКТОРОВ НА ОГНЕЗАЩИТНУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОКРЫТИЯ**

**Цель.** Исследовать влияние эксплуатационных факторов на устойчивость и огнезащитную эффективность покрытия на основе жидкого стекла.

**Методы.** Испытания по определению гигроскопичности и водостойкости покрытия гравиметрическим методом, экспериментальная оценка теплоизоляционной способности вспененного кокса и огнезащитной эффективности покрытия на лабораторной установке.

**Результаты.** Проведены исследования и оценка влияния воды, влаги на устойчивость и огнезащитную эффективность покрытия на основе жидкого стекла. Экспериментально установлено, что стационарное воздействие воды в течение 3 сут значительно снижает адгезионную прочность покрытия к металлу, воздействие влаги несущественно влияет на устойчивость покрытия. Выполнена модификация связующего вещества – жидкого стекла, щелочной фенолформальдегидной смолой Резолит Н для повышения водостойкости и огнезащитных свойств покрытия. Установлено, что после модификации эксплуатационные факторы незначительно влияют на теплоизоляционные свойства вспененного кокса и огнезащитную эффективность покрытия: время наступления предельного состояния покрытия на стальных пластинах не сократилось после воздействия на него воды в течение 3 сут и влажности – 30 сут.

**Научная новизна.** Впервые установлены зависимости теплоизоляционных свойств вспененного кокса огнезащитного покрытия от влияния воды, влаги.

**Практическая значимость.** Методики испытаний содержат достоверные показатели об устойчивости огнезащитного покрытия к воздействию внешних факторов среды и позволяют оценить их влияние на огнезащитную эффективность покрытий для металлических конструкций. Испытания по данным методикам просты, не требуют сложного оборудования, позволяют контролировать изменение устойчивости огнезащитного покрытия к воздействию воды и влаги в ходе разработки. Предложенные методики могут стать основой для разработки единой оценки огнезащитной эффективности покрытия для предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций во время пожара.

**Ключевые слова:** *вспучивающееся покрытие; жидкое стекло; модификация; огнезащитная эффективность; эксплуатационный фактор.*

**Постановка проблемы.** С целью предотвращения преждевременного обрушения или утраты несущей способности железобетонных, металлических и деревянных конструкций во время пожара, возгорания или горения деревянных материалов и горючих пластиков строительные конструкции обрабатывают различными огнезащитными покрытиями.

В результате фотохимических процессов, инициируемых солнечным светом, процессов окислительной и гидролитической деструкции под воздействием

кислорода, изменения температур окружающей среды, влажности, ультрафиолетового излучения и других внешних факторов неизбежно происходит разрушение огнезащитных покрытий, которое проявляется в изменении цвета, растрескивании, отслаивании, вздутии и других внешних признаках. При этом эффект огнезащиты покрытия может быть утрачен частично или полностью.

Поэтому решение проблемы, связанной со сроком службы огнезащитных покрытий, имеет не только научно-технический интерес, но также большое практическое и экономическое значение.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Детальное рассмотрение вопроса влияния условий эксплуатации и процесса естественного старения на прочностные и огнезащитные свойства вспучивающихся (интумесцентных) покрытий содержится в работе [1]. Результаты исследований [2–3] также ставят под сомнение длительные сроки эксплуатации интумесцентных покрытий, несмотря на условия эксплуатации в благоприятных условиях. Диффузия и растворимость кислорода в поверхностной пленке покрытия, наличие в ней реакционноспособных групп – основные факторы, которые обуславливают старение покрытий под действием кислорода. Данные показатели можно проверить путем натурных испытаний в соответствии с ГОСТ 9.906-83 «Единая система защиты от коррозии и старения. Станции климатические испытательные. Общие требования». Однако стандартные испытания отличаются высокой трудоемкостью и временными затратами, так как срок службы многих огнезащитных средств более 10 лет, а продолжительность испытаний соответствует прогнозируемому сроку службы.

В связи с этим разработка обобщенного подхода к изучению основных закономерностей и влияния условий эксплуатации огнезащитного покрытия на его огнезащитную эффективность – актуальная задача.

**Цель работы** – исследовать и оценить влияние эксплуатационных факторов на устойчивость и огнезащитную эффективность покрытия на основе жидкого стекла для металлических строительных конструкций.

**Изложение основного материала.** Объект исследования – огнезащитное покрытие для металлических конструкций [4, 5].

Экспериментальные исследования проводили на стальных пластинах размерами 120×80×1 мм, покрытых огнезащитным средством.

**Методы исследований.** Для испытания на гигроскопичность в эксикатор с относительной влажностью воздуха, близкой к 100 %, помещали испытуемые образцы с покрытием и выдерживали их в естественных условиях в течение 30 сут с периодическим визуальным наблюдением за состоянием огнезащитного покрытия (рис. 1).

Гигроскопичность образца с огнезащитным покрытием определяли по формуле

$$H = \frac{(m - m_0)}{m_0} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $H$  – поглощение влаги образцом, %;  
 $m$  – масса образца после испытания, г;  
 $m_0$  – масса образца до испытания, г.



а

б

Рис. 1. Испытания огнезащитных покрытий  
 по воздействию на них эксплуатационных факторов:  
 а – вода (3 сут); б – влажность (30 сут)

Покрытие считали выдержавшим испытание на гигроскопичность, если сохранялись его целостность (отсутствие трещин, разрушения, отслаивания и др.) и огнестойкость.

Для испытания на водостойкость подготовленные образцы с помощью устройства, удерживающего их в требуемом положении, погружали вертикально в сосуд с водой на 3 сут. В процессе испытания проводили регулярное визуальное наблюдение за состоянием огнезащитного слоя. После окончания испытания образцы вынимали из сосуда с водой, высушивали до постоянной массы в термощкафу при температуре  $(50 \pm 5) ^\circ\text{C}$  и оценивали огнестойкость на лабораторной установке.

Поглощение воды образцами покрытия на стальных пластинах определяли по изменению массы огнезащитного покрытия после воздействия воды по формуле

$$W = \frac{(m_{0\text{пл}} - m_{\text{пл}})}{S\tau}, \quad (2)$$

где  $W$  – поглощение воды огнезащитным покрытием,  $\text{г} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{ч}^{-1}$ ;

$m_{0\text{пл}}$  – масса пластины до проведения испытания, г;

$m_{\text{пл}}$  – масса пластины после проведения испытания, г;

$S$  – площадь испытуемой поверхности образца,  $\text{м}^2$ ;

$\tau$  – время проведения испытания, ч.

Покрытие считали выдержавшим испытание на водостойкость, если сохранялись его целостность и огнестойкость.

Оценка теплоизоляционной способности вспененного кокса и огнезащитной эффективности покрытия заключается в определении времени достижения

предельного состояния образца покрытия – температуры необогреваемой стороны образца 500 °С – на стальной пластине толщиной 1 мм. Испытания образцов проводили на лабораторной установке для исследования и оценки огнезащитных свойств вспучивающегося покрытия для металлических строительных конструкций. Температуру обратной поверхности образца измеряли с помощью термопары. Секундомером определяли время с момента включения печи до наступления предельного состояния образца и фиксировали выделение дыма, продуктов горения после испытаний (качество вспучивания, обугливание, отслоение, рыхлость кокса и др.). Критерий оценки теплоизолирующей способности кокса и огнезащитной эффективности покрытия – время достижения необогреваемой стороной образца критической температуры 500 °С.

Для испытаний по оценке теплоизоляционной способности вспененного кокса и огнезащитной эффективности покрытия использовали следующие образцы металла (табл. 1):

- без покрытия;
- покрытые огнезащитным средством и не подвергавшиеся испытаниям (контрольные);
- покрытые огнезащитным средством, прошедшие испытания на устойчивость к воздействию воды и влаги.

Таблица 1

Результаты испытаний огнезащитного покрытия

| Объект исследования                 | Эксплуатационный фактор | Поглощение влаги образцом, % | Результат визуального наблюдения за образцом при испытаниях                 | Время наступления предельного состояния образца, мин |
|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Огнезащитный состав                 | Вода                    | 6,7                          | Горения, выделения дыма и газов не наблюдается, кокс рыхлый, осыпался       | 7,7                                                  |
|                                     | Влага                   | 5,5                          | Без разрушений, горения нет, вспучивание есть, кокс прочный, не рассыпается | 10                                                   |
|                                     | Без воздействия         | 5,2                          | Кокс прочный, изменения цвета нет                                           | 7,7                                                  |
| Металлическая пластина без покрытия | Без воздействия         | –                            | –                                                                           | 5                                                    |

На основании результатов экспериментальных исследований получены динамики температуры образцов без воздействия (контрольный образец)

и после воздействия воды и влажности для огнезащитного средства (рис. 2).

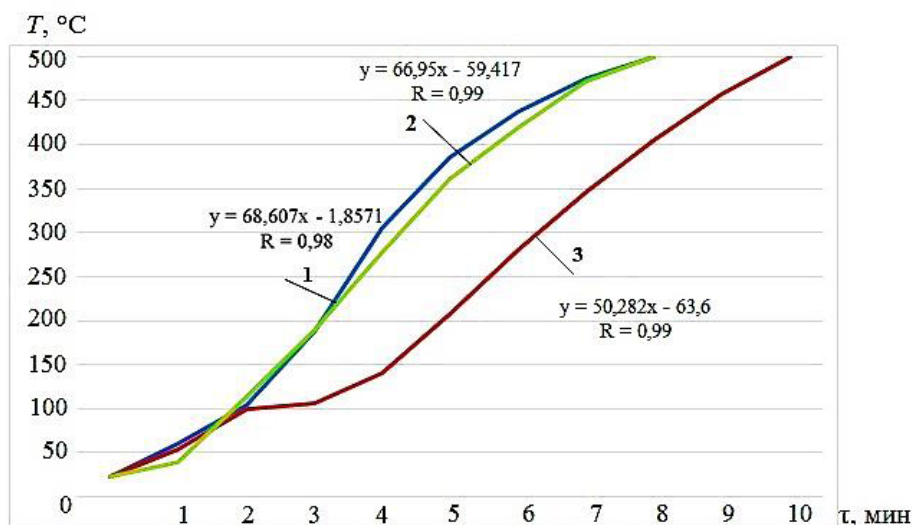


Рис. 2. Зависимости динамики температуры образцов:  
1 – без воздействия воды и влаги (контрольный); 2 – после воздействия воды;  
3 – после воздействия влаги

Воздействие воды не оказало существенного влияния на теплоизоляционные свойства огнезащитного покрытия: изменение температур образцов без воздействия и после воздействия воды практически одинаково (рис. 2). Однако вспученный слой оказался слишком хрупким и рыхлым, что привело к значительному снижению его адгезии к стальной пластине и осыпанию кокса после испытаний по определению теплоизоляционной способности вспененного кокса и огнезащитной эффективности покрытия на лабораторной установке (рис. 3).



Рис. 3. Внешний вид покрытия после воздействия воды и испытаний на лабораторной установке

Снижение адгезионной прочности покрытия можно объяснить склонностью жидкого натриевого стекла (связующего вещества, содержание которого

в рецептуре составляет до 70 %) к вымыванию при нахождении в воде. Воздействие влажности не оказало отрицательного влияния на огнезащитную эффективность покрытия (рис. 2). Время достижения критической температуры (500 °С) образца после воздействия влажности увеличилось до 10 мин по сравнению со временем достижения критической температуры образца без воздействия влажности (7,7 мин), что можно объяснить изменениями в составе покрытия, связанными с кристаллизацией, гидролизом, испарением воды и др.

Значения коэффициента детерминации близки к единице (0,98...0,99), что свидетельствует о весьма сильной корреляционной связи параметров полученных аналитических зависимостей.

Покрытие на металле оказалось неустойчивым к воздействию воды, его можно считать неводостойким огнезащитным средством.

Исходя из этого, принято решение о повышении водостойкости, термической и огневой стойкости силикатной матрицы путем введения в композицию щелочной фенолформальдегидной смолы Резолит Н и сложноэфирного отвердителя АМС-5.

В силикатном связующем веществе частицы диоксида кремния ( $\text{SiO}_2$ ) действуют как центры кристаллизации, а добавка фенолформальдегидной смолы способствует заполнению силикатной матрицы и формированию сшитого полимера, что увеличивает водостойкость связующего вещества. Таким образом, в состав огнезащитного покрытия входит комбинированное (гибридное) полимер-неорганическое связующее вещество. Добавка смолы Резолит Н в количестве 7 масс. % от массы жидкого стекла оказала положительное влияние на водостойкость и огнезащитную эффективность покрытия: динамика температур образцов, испытанных без добавки и с добавкой смолы Резолит Н, отличается (табл. 2).

Таблица 2

## Динамика увеличения температуры образцов

| Время<br>испытания,<br>мин | Температура на необогреваемой стороне стальной пластины<br>с образцом покрытия, °С |                   |
|----------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
|                            | до модификации                                                                     | после модификации |
| 1                          | 60                                                                                 | 50                |
| 2                          | 105                                                                                | 97                |
| 3                          | 187                                                                                | 103               |
| 4                          | 305                                                                                | 124               |
| 5                          | 385                                                                                | 180               |
| 6                          | 438                                                                                | 246               |
| 7                          | 475                                                                                | 311               |
| 7,7                        | <b>500</b>                                                                         | 370               |
| 9                          | 550                                                                                | 423               |
| 10                         | 600                                                                                | 472               |
| 11                         | 650                                                                                | <b>500</b>        |

Время достижения предельной температуры (500 °С) образцом покрытия без модификации составило 7,7 мин, с модификацией – 11 мин при одинаковой толщине слоя покрытия (1,5 мм). Установлено, что увеличение массового содержания смолы (более 7 масс. % от массы жидкого стекла) нецелесообразно, так как приводит к расслоению жидкой фазы полимерного силикатного связующего и потере его реологических свойств.

Модификация жидкого стекла смолой Резолит Н оказалась эффективной для повышения водостойкости и огнезащитных свойств покрытия на его основе.

**Выводы.** В результате исследования влияния эксплуатационных факторов (воды и влаги) на устойчивость, термоизоляционные свойства кокса и огнезащитную эффективность покрытия на основе жидкого стекла для металлических конструкций установлено, что для повышения водостойкости покрытия необходима модификация жидкого стекла фенолформальдегидной смолой Резолит Н, воздействие воды и влаги незначительно повлияло на огнезащитные свойства модифицированного покрытия.

#### Список литературы / References

1. Кузнецова, Т.А. Определение срока службы огнезащитных покрытий / Т.А. Кузнецова // Науковий вісник УкрНДІПБ. – 2007. – № 2(16). – С. 125 – 128.

Kuznetsova T.A. *Opredelenie sroka sluzhby ognezashhitnykh pokrytii* [Determination of durability of fire-retardant coatings]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB – Scientific Bulletin of the Ukrainian Civil Defence Scientific Research Institute*, 2007, no. 2(16), pp. 125-128. (In Russian).

2. Вахитова, Л.Н. Срок службы огнезащитных покрытий вспучивающегося типа / Л.Н. Вахитова, М.П. Лапушкин, К.В. Калафат // Независимый украинский журнал F+S: технологии безопасности и противопожарной защиты. – 2011. – № 2(50). – С. 58 – 61.

Vakhitova L.N., Lapushkin M.P., Kalafat K.V. *Srok sluzhby ognezashhitnykh pokrytii vspuchivayushhegosya tipa* [Durability of fire-retardant coatings, intumescent type]. *Nezavisimy ukrainskii zhurnal F+S: tekhnologii bezopasnosti i protivopozharnoi zashhity – F+S independent Ukrainian journal: technologies of safety and fire protection*, 2011, no. 2(50), pp. 58-61. (In Russian).

3. Андронов, В.А. Подходы к определению сроков службы огнезащитных полимерных покрытий / В.А. Андронов, Ю.М. Данченко, О.М. Бухман // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. – 2012. – Вып. 31. – С. 10 – 18.

Andronov V.A., Danchenko Yu.M., Bukhman O.M. *Podkhody k opredeleniyu srokov sluzhby ognezashhitnykh polimernykh pokrytii* [Approaches to determination of durability of polymeric fire-retardant coatings]. *Problemy pozharnoi bezopasnosti: sb. nauch. tr.* [Problems of fire safety: collection of scientific papers]. 2012, issue 31, pp. 10-18. (In Russian).

4. Лебедева, В.В. Покрытие для огнезащиты деревянных конструкций / В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2021. – № 1(58). – С. 27 – 33.

Lebedeva V.V., Nepochatykh I.N. *Pokrytie dlya ognezashhity derevyannykh konstruksii* [Coating for fire-protection of wooden constructions]. *Nauchnyi vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2021, no. 1(58), pp. 27-33. (In Russian).

5. Лебедева, В.В. Материал для огнезащиты деревянных строительных конструкций / В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых, О.В. Храпоненко // Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования: науч. журн. – Донецк, 2021. – № 1(8). – С. 264 – 268.

Lebedeva V.V., Nepochatykh I.N., Khraponenko O.V. *Material dlya ognezashhity derevyannykh stroitel'nykh konstruksii* [Material for fire protection of wooden building constructions]. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya: nauch. zhurn.* [Fire and technosphere safety: problems and ways of improvement: scientific journal]. Donetsk, 2021, no. 1(8), pp. 264-268. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым  
Дата поступления рукописи 08.12.2021

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

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

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

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

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

## INFLUENCE OF OPERATIONAL FACTORS ON FIRE-RETARDANT EFFECTIVENESS OF COATING

**Purpose.** To investigate the influence of the operational factors on resistance and fire-retardant effectiveness of the soluble silicate-based coating.

**Methods.** Tests for determination of hygroscopicity and water-resistance of the coating applying the gravimetric method, experimental assessment of the foamed coke heat-insulating ability and the coating fire-proof effectiveness in the laboratory-scale apparatus.

**Results.** The investigations and evaluation of the influence of the exposure to water and moisture on the resistance and the fire-retardant effectiveness of the soluble silicate-based coating have been fulfilled. It has been experimentally established that the stationary-state three-day exposure to water significantly reduces the coating adhesive strength to metal; the exposure to moisture does not affect considerably the coating resistance. In order to increase the water-resistance and fire-retardant properties of the coating the modification of the binding agent, i.e. soluble silicate, has been performed with the Резолит Н alkali phenol-formaldehyde resin. It has been established that after the modification the operational factors influence insignificantly the heat-insulating properties of the foamed coke and the fire-retardant effectiveness

of the coating: the period of the coating limit state gain on the steel plates has not reduced after the three-day exposure to water and the thirty-day exposure to moisture.

**Scientific novelty.** The novel dependences of the foamed coke heat-insulating properties of the coating from the influence of water and moisture have been established.

**Practical value.** The testing methodologies contain the reliable indices of the fire-retardant coating resistance to the acting environment factors and make it possible to estimate their influence on the fire-retardant effectiveness of the coatings for the metal constructions. The tests according to these methodologies are simple and do not require the sophisticated equipment; they permit to monitor a change in the resistance of the fire-retardant coating to the water and moisture exposure in the development process. The proposed methodologies may become a foundation for development of the unified assessment of the fire-retardant effectiveness of the coating in order to prevent emergencies from occurrence during a fire.

**Keywords:** *intumescent coating; soluble silicate; modification; fire-retardant effectiveness; operational factor.*

УДК [622.822.7:614.842.62]:614.843.2

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

*Дмитрий Сергеевич Буряк, науч. сотр.; e-mail: buryak\_ds@rambler.ru*

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

## ОБОСНОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РУКАВНЫХ ЛИНИЙ

**Цель.** Установить аналитические закономерности для определения расходно-напорных характеристик в точке отбора воды для пожаротушения.

**Методы.** Аналитические исследования гидравлических процессов при подаче воды по рукавным линиям для пожаротушения.

**Результаты.** Рассмотрены основные факторы, влияющие на гидравлические параметры подачи воды по рукавным линиям для пожаротушения. Установлена зависимость для определения значений расхода и напора воды в расчетной точке отбора с учетом геодезических отметок, протяженности, диаметра и удельных гидравлических сопротивлений рукавной линии.

**Научная новизна.** Полученная зависимость повышает точность определения гидравлических параметров рукавных линий.

**Практическая значимость.** Результаты исследований позволяют определить расходно-напорные характеристики применяемых пожарных рукавов, их оптимальное количество и выбрать рациональные схемы прокладки рукавных линий при подаче воды в очаг пожара.

**Ключевые слова:** *пожар; гидравлические параметры; рукавные линии; параллельная схема прокладки; последовательная схема прокладки.*

**Постановка проблемы.** Вследствие агрессивного воздействия шахтных вод и постоянной динамики горных работ зачастую возникает проблема замены пришедшего в негодность противопожарного трубопровода и прокладки нового. Кроме того, для уже проложенного трубопровода существует опасность выхода из строя установленных на нем пожарных кранов. Так, для горизонтальных выработок расстояние между пожарными кранами составляет 200 м, а в случае поломки одного из промежуточных кранов и невозможности подойти к очагу с концов выработки оно увеличивается до 400 м. Для обеспечения нормативных значений подачи воды в выработки, в которых отсутствует трубопровод, на шахтах предусмотрено необходимое количество пожарных рукавов, а также там организуют пункты для их хранения и быстрой доставки в аварийные выработки. Ввиду больших перепадов высоты, значительных расстояний между точкой подключения и местом тушения пожара, с учетом всех гидравлических характеристик применяемого оборудования возникает необходимость в получении аналитических зависимостей, позволяющих учесть указанные параметры при определении расхода и напора воды в расчетной точке и оптимального количества пожарных рукавов.

**Анализ последних публикаций.** В работе [1] предложена методика расчета параметров рукавной линии для аварийной подачи воды по выработке, не

имеющей противопожарного трубопровода, однако в основе указанной методики – необходимость обеспечения максимального расхода воды без учета ограничений на разрывное давление рукавов и схемы их подключения. Авторами в статье [2] для наглядности и удобства пользования были приведены разработанные ими таблицы, которые в некоторых ситуациях позволяют оперативно определить гидравлические параметры прокладываемых рукавных линий. Однако применение данных таблиц ограничено отсутствием расчетов по наклонным поверхностям и наличием расчетов только для прорезиненных пожарных рукавов. В работе [3] с целью повышения надежности и долговечности оборудования получены аналитические зависимости, позволяющие оценить влияние многочисленных параметров самой линии и концевое оборудование (насоса и пожарного ствола) на скачкообразное повышение давления.

Устав по организации и ведению горноспасательных работ Государственной военизированной горноспасательной службой Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики – действующий нормативный документ, в котором приведена методика по определению параметров рукавной линии. Однако с помощью расчетной методики указанного документа нельзя определить гидравлические параметры рукавной линии, проходящей одновременно по горизонтальным и наклонным выработкам, в ней нет ограничения на разрывное давление рукавов.

**Цель исследования.** Установить аналитические закономерности для определения расходно-напорных характеристик в точке отбора воды для пожаротушения.

**Материалы и результаты исследования.** На величину напора пожарного ствола влияют величины напора воды в точке подключения рукавной линии к трубопроводу (либо насосному оборудованию), параметры рукавной линии (диаметр и гидравлическое сопротивление внутренней поверхности пожарного рукава), количество соединительных пожарных головок, разность геодезических отметок начальной и конечной точек, диаметр ручного пожарного ствола, местные сопротивления.

Для обеспечения требуемого напора воды в точке тушения пожара необходимо выполнить условия следующего неравенства:

$$H_{\text{тп}} - 1,05kl_p Q^2 + l_{\text{ур}} \sin \alpha - l_{\text{пр}} \sin \beta - H_{\text{с}} - H_{\text{гс}} \geq 0, \quad (1)$$

где  $H_{\text{тп}}$  – напор воды в точке подключения рукавной линии, м;

$k$  – удельное сопротивление пожарных рукавов,  $\text{с}^2/\text{л}^2$ . Значение может быть определено из таблицы в работе [4];

$l_p$  – длина рукавной линии, м;

$Q$  – расход воды по рукавной линии, л/с;

$l_{\text{ур}}$  – длина рукавной линии, проложенной по уклону горной выработки, м;

$\alpha$  – угол уклона горной выработки, градус;

$l_{\text{пр}}$  – длина рукавной линии, проложенной по подъему горной выработки, м;

$\beta$  – угол подъема горной выработки, градус;

$H_c$  – напор воды перед пожарным стволом, обеспечивающий дальность полета струи с учетом сопротивления ручного пожарного ствола, м;

$H_{\text{гс}}$  – напор воды для преодоления сопротивления соединительных пожарных головок, м.

Согласно работе [5] указанным значением можно пренебречь при прокладке линий на небольшие расстояния либо при прокладке пожарных рукавов длиной 100 м.

Неравенство (1) должно удовлетворять еще одному условию, а именно: быть меньше разрывного давления пожарных рукавов  $H_{\text{рд}}$ , м, значение которого зависит от типа пожарного рукава. Таким образом, имеем

$$0 \leq H_{\text{п}} - 1,05kl_{\text{р}}Q^2 + l_{\text{уп}}\sin\alpha - l_{\text{пр}}\sin\beta - H_c - H_{\text{гс}} < H_{\text{рд}}. \quad (2)$$

Неравенство (2) не выполняется в следующих случаях:

- напор воды в точке подключения меньше необходимого для преодоления гидравлического сопротивления по всей длине рукавной линии;
- напор воды в точке подключения недостаточный для преодоления подъема горной выработки и обеспечения необходимых параметров струи для пожарного ствола;
- напор воды в точке подключения превышает разрывное давление пожарных рукавов;
- рукавная линии проложена на значительную длину по уклонной горной выработке, что приводит к нарастанию давления воды.

Недостаток давления воды в точке подключения можно компенсировать прокладкой рукавов в две или более параллельных линии. Напор воды  $H_{\text{пс}}$ , м, для параллельной схемы соединения пожарных рукавов от единой точки подключения с последующим подсоединением ветвей к одному пожарному стволу определяют по формуле

$$H_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n \left( Q_i \sqrt{k_i l_i} \right)^2, \quad (3)$$

где  $l_i$  – протяженность  $i$ -й параллельной рукавной линии, м;

$k_i$  – удельное сопротивление  $i$ -й параллельной рукавной линии,  $\text{с}^2/\text{л}^2$ ;

$Q_i$  – расход воды по  $i$ -й параллельной рукавной линии, л/с.

При прокладке в параллельных линиях пожарных рукавов одного диаметра удельные гидравлические сопротивления в них будут равны между собой ( $k_1=k_2=\dots=k_n=k_{\text{п}}$ ), и формула (3) примет вид

$$H_{\text{пс}} = \frac{k_{\text{п}}}{n^2} Q^2 l_{\text{пл}}, \quad (4)$$

где  $n$  – количество параллельных линий;

$l_{пл}$  – протяженность всех параллельных ветвей рукавной линии, м.

Однако применение формулы (4) приводит к увеличению количества пожарных рукавов в два раза. Для определения оптимального количества рукавов при параллельном соединении приведем неравенство (2) к следующему виду:

$$0 \leq H_{общ} - 1,05Q^2(k_{пс}l_{пс} - \frac{k_{п}}{n^2}l_{пл}) < H_{рд}, \quad (5)$$

где  $H_{общ} = H_{п} - H_{гс} - H_{с} + l_{ур} \sin \alpha - l_{пр} \sin \beta$ ;

$k_{пс}$  – гидравлическое сопротивление участка пожарного рукава при последовательном соединении,  $с^2/л^2$ ;

$l_{пс}$  – протяженность участка рукавной линии при последовательном соединении, м.

$$l_{пл} = l_{р} - l_{пс}. \quad (6)$$

Приравнявая к нулю среднюю часть неравенства (5), определим значение  $l_{пс}$

$$l_{пс} = \frac{n^2(H_{общ} - k_{лр}Q^2)}{1,05Q^2(n^2k_{пс} - k_{п})}. \quad (7)$$

При прокладке рукавных линий также возможно увеличение давления за счет их значительной длины по уклонной горной выработке. В этом случае снизить давление можно регулирующей арматурой либо за счет увеличения удельного гидравлического сопротивления прокладываемых пожарных рукавов. Преобразуем неравенство (2)

$$0 \leq H_{общ} - 1,05kQ^2(l_{рд} + ml_{уд}) < H_{рд}, \quad (8)$$

где  $l_{рд}$  – протяженность прокладываемых пожарных рукавов с расчетным гидравлическим сопротивлением, м;

$m$  – коэффициент гидравлического сопротивления;

$l_{уд}$  – протяженность прокладываемых пожарных рукавов с большим гидравлическим сопротивлением, м,

$$l_{уд} = l_{р} - l_{рд}.$$

Приравнявая к нулю среднюю часть неравенства (8), определим значение  $l_{уд}$

$$l_{уд} = \frac{H_{общ} - mkl_{р}Q^2}{1,05Q^2k(m-1)}.$$

Общее количество пожарных рукавов  $N$ , шт., находят по формуле

$$N = \frac{l_{\text{пс}}}{20} + n \frac{l_{\text{пл}}}{20}.$$

Для наглядности определим способ прокладки и количество пожарных рукавов при следующих условиях. Пожарные рукава диаметром 77 мм (удельное гидравлическое сопротивление  $0,00077 \text{ с}^2/\text{л}^2$ ) прокладывают по двум последовательным горным выработкам, первая с углом наклона  $15^\circ$  и длиной 100 м, вторая горизонтальная длиной 150 м. Давление воды на выходе из пожарного крана в месте подключения составляет 70 мм вод. ст.

Значение средней части неравенства (2) составит 7 мм вод. ст. Таким образом, имеем недостаточное давление в точке подключения, которое можно компенсировать прокладкой пожарных рукавов по параллельной схеме подключения. По формуле (7) длина каждой из двух параллельных линий составляет 169 м, длина последовательного участка – 81 м. По формуле (11) суммарное количество пожарных рукавов длиной 20 м составляет 22 шт.

**Выводы.** Установлены зависимости, позволяющие обеспечить необходимые значения расхода и напора воды в расчетной точке отбора за счет применения рациональной схемы прокладки рукавных линий с учетом их технических характеристик и перепадов высот по пути их маршрута.

#### Список литературы / References

1. Лапин, К.И. Параметры прокладываемых в аварийных ситуациях рукавных линий / К.И. Лапин, А.Ю. Коляда // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. – Донецк: НИИГД «Респиратор», 2011. – Вып. 48. – С. 115 – 118.

Lapin K.I., Kolyada A.Yu. *Parametry prokladyvaemykh v avariinykh situatsiyakh rukavnykh linii* [Parameters of laid out fire-fighting lines in emergency situations]. *Gornospasatel'noe delo: sb. nauch. tr.* [Mine-rescue work: collection of scientific papers]. Donetsk, NIIGD "Respirator" Publ., 2011, issue 48, pp. 115-118. (In Russian).

2. Теребнев, В.В. Расчет параметров пожарно-насосных систем / В.В. Теребнев, В.Н. Атаманов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 10(20). – С. 48 – 56.

Terebnev V.V., Atamanov V.N. *Raschyot parametrov pozharно-nasosnykh sistem* [Calculation of parameters of fire pump systems]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2011, no. 10(20), pp. 48-56. (In Russian).

3. Пефтибай, Г.И. Математическое описание переходных процессов в системе «насос – пожарный рукав – ствол» / Г.И. Пефтибай, Н.А. Галухин, Э.Г. Чайковская // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 4(53). – С. 84 – 92.

Peftibay G.I., Galukhin N.A., Chaikovskaya E.G. *Matematicheskoe opisanie perekhodnykh protsessov v sisteme "nasos – pozharnyi rukav – stvol"* [Mathematical description of transition processes in "pump – fire hose – nozzle" system]. *Nauchnyi*

*vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 4(53), pp. 84-92. (In Russian).

4. Абросимов, Ю.Г. Гидрогазодинамика / Ю.Г. Абросимов, В.В. Жучков, С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2015. – 325 с.

Abrosimov Yu.G., Zhuchkov V.V., Puzach S.V. *Gidrogazodinamika* [Hydrogasdynamics]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Press, 2015, 325 p. (In Russian).

5. Ольховский, И.А. Оценка влияния головок соединительных пожарных на потери напора по длине рукавной линии / И.А. Ольховский, О.В. Двоенко // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2016. – № 2(19). – С. 64 – 66.

Ol'khovskii I.A., Dvoenko O.V. *Otsenka vliyaniya golovok soedinitel'nykh pozharnykh na poteri napora po dline rukavnoi linii* [Estimation of influence of fire hose couplings on pressure losses along the fire-fighting line length]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii – Bulletin of the Voronezh Fire Service Institute of EMERCOM of Russia*, 2016, no. 2(19), pp. 64-66. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 19.11.2021

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

*Dmitry Sergeyevich Buryak*, scientific associate; e-mail: buryak\_ds@rambler.ru

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

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

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

## SUBSTANTIATION OF HYDRAULIC PARAMETERS OF FIRE-FIGHTING LINES

**Purpose.** To establish analytical regularities for determining flow rate-and-pressure characteristics in a point of water intake for fire extinguishment.

**Methods.** Analytical investigations of the hydraulic processes during supply of water through the fire-fighting lines for fire extinguishment.

**Results.** The main factors affecting the hydraulic parameters of water supply through the fire-fighting lines for fire extinguishment have been examined. The dependence for determining the water flow rate and pressure values in the water intake check point has been established factoring in geodesic marks, length, diameter and specific hydraulic resistances of a fire-fighting line.

**Scientific novelty.** The derived dependence improves the precision of determination of the hydraulic parameters of the fire-fighting lines.

**Practical value.** The results of the investigations permit to determine the flow rate-and-pressure characteristics of the fire hoses in use, their optimal amount and to select the rational lay-outs of fire-fighting lines during water supply to a seat of fire.

**Keywords:** fire; hydraulic parameters; fire-fighting lines; parallel lay-out; sequential lay-out.

### III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК [502.3:504.5]:621.182

*Анатолий Филиппович Долженков, д-р техн. наук, замдиректора по научной работе;  
e-mail: dolzhenkov\_52@mail.ru;*

*Екатерина Кайржановна Джалетова, инж.; e-mail: ekaterinajaletova@yandex.ru*

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

*Анастасия Александровна Никулина, студентка; e-mail: nastay93726nikulina@mail.ru*

*ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»  
286123, г. Макеевка, ул. Державина, 2. Тел.: (+38 071) 424-48-92*

#### ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ ВЫБРОСАМИ КОТЕЛЬНЫХ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

**Цель.** Обоснование подходов к оценке экологического риска загрязнения атмосферы при эксплуатации коммунальных котельных малой мощности.

**Методы.** При решении поставленных задач были использованы анализ, обобщение и систематизация расчетов величин выбросов загрязняющих веществ в атмосферный воздух в соответствии с нормативными документами, устанавливающими порядок определения выбросов основных загрязняющих веществ и парниковых газов, поступающих в атмосферный воздух с дымовыми газами, образующимися во время сжигания органического топлива в энергетических установках.

**Результаты.** Рассмотрены требования к оценке экологического риска загрязнения атмосферы выбросами коммунальных котельных малой мощности, обусловленного выделением в атмосферу вредных веществ, являющихся продуктом неполного сгорания природного газа. Установлено, что замена котлов НИИСТУ-5 на котлы Viessmann Vitoplex 100 тип PV1 позволит сократить выбросы парниковых газов в атмосферный воздух.

**Научная новизна.** Обоснованы методологические подходы к оценке экологического риска загрязнения атмосферы при эксплуатации коммунальных котельных малой мощности. Получены математические модели для оценки экологического риска загрязнения атмосферы выбросами коммунальных котельных малой мощности.

**Практическая значимость.** Полученные результаты позволят обосновать расход и состав использованного топлива и характеристики энергетических и газоочистных установок, оценить количественные значения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от котельных, оборудованных котлами малой мощности.

**Ключевые слова:** источники теплоснабжения; котельные малой мощности; водогрейные котлы; экологический риск; опасные и вредные химические вещества.

**Постановка задачи.** Коэффициент полезного действия (КПД) котельных малой мощности коммунальных предприятий, которые помимо ТЭС обеспечивают теплоснабжение населения Донецкой Народной Республики, не превышает 70...80 %. Также их техническое состояние не всегда соответствует существующим нормативным требованиям. Более 50 % котельных эксплуатируют свыше 30 лет.

Около одной трети котельных оснащены устаревшими и низкоэффективными котлами следующих типов: НИИСТУ-5, «Энергия», КЧМ, Ревокатова, «Универсал» и др. У данных котлов низкий КПД, устаревшая автоматика и горелочные устройства, что приводит к значительным расходам топлива [1], поэтому замена подобных устаревших котлов на современные модели заметно уменьшит расходы энергоносителей на стадии производства тепловой энергии.

Решение существующих проблем коммунальной теплоэнергетики нуждается в комплексном подходе на государственном уровне для внедрения энергосберегающих и экологически эффективных технологий, что обеспечит сокращение расходов первичных энергоносителей, уменьшение себестоимости произведенной энергии и снижение негативного воздействия на окружающую среду.

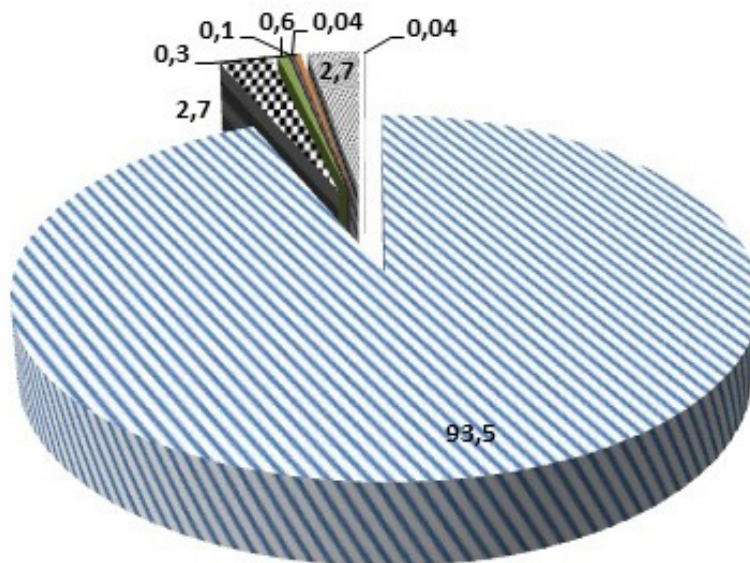
**Анализ последних исследований.** Население Донецкой Народной Республики обеспечено теплоснабжением в основном за счет котельных малой мощности, оснащенных чугунными и стальными секционными водогрейными котлами.

В коммунальных котельных широко распространены чугунные секционные котлы шатрового типа с нижней топкой, производство которых еще продолжается в настоящее время: котлы «Универсал-6» и «Универсал-6М», «Факел-Г», «Тула-3», КЧ-1, а также уже снятые с производства, но эксплуатируемые котлы «Тула-1», «Энергия-6» и др. [1, 2].

Чугунные секционные котлы позволяют нагревать воду до температуры 115 °С при давлении в системе отопления до 0,6 МПа. Производительность таких котлов составляет до 1 Гкал/ч. Поверхность нагрева является основной характеристикой котлов. Она представляет собой поверхность труб секций котла, которые обогреваются продуктами сгорания природного газа с одной стороны и охлаждаются водой с другой. Измеряется поверхность нагрева по газовой стороне в м<sup>2</sup> [2, 3].

В отопительных и небольших производственных котельных кроме секционных чугунных котлов распространены также стальные секционные котлы НР-18, «Надточия» и НИИСТУ-5, которые собирают методом сварки из трубных секций разной формы [4]. Состав природного газа, поступающего на территорию Донецкой Народной Республики, представлен на рисунке.

Риск экологического загрязнения атмосферы при эксплуатации коммунальных котельных малой мощности обусловлен выделением в атмосферу вредных веществ, являющихся продуктом неполного сгорания природного газа. Это, в первую очередь, угарный газ (СО), содержание в воздухе которого 0,4...0,5 % опасно для жизни человека [5, 6]; углекислый газ (СО<sub>2</sub>), накопление которого в атмосфере приводит к парниковому эффекту; оксиды азота (NO, NO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O), достигающие 30...50 % в суммарном выбросе вредных веществ в атмосферу, тяжелые металлы и их соединения и другие вещества, что может привести к превышению предельно допустимой концентрации этих веществ в атмосферном воздухе на территориях, прилегающих к котельным.



Состав газа по объему, %:

$\text{CH}_4$ ;  $\text{C}_2\text{H}_6$ ;  $\text{C}_3\text{H}_8$ ;  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ;  
 $\text{C}_5\text{H}_{12}$ ;  $\text{CO}_2$ ;  $\text{N}_2$ ;  $\text{N}_2\text{S}$

**Цель работы** – обоснование подходов к оценке экологического риска загрязнения атмосферы при эксплуатации коммунальных котельных малой мощности.

**Результаты исследования.** Во время сжигания органического топлива в энергетических установках в атмосферный воздух вместе с дымовыми газами поступают загрязняющие вещества. Суммарный риск утраты здоровья людей  $R$  от приведенных выше опасных и вредных химических веществ (ОВХВ), продуктов неполного сгорания органического топлива при эксплуатации коммунальных котельных малой мощности находится в зависимости от двух компонентов – интенсивности и времени их воздействия – и определяется по формуле

$$R = f\left[\sum_{i=1}^n P_{\text{ОВХВ}}(t)\right],$$

где  $P_{\text{ОВХВ}}$  – интенсивность опасных и вредных химических веществ, г/с;  
 $t$  – время воздействия опасных и вредных химических веществ, с.

Валовые выбросы загрязняющих веществ и парниковых газов определяют, основываясь на постоянных измерениях концентраций загрязняющих веществ в выбросах газов энергетических установок и на основе расчетных данных о расходах, составе использованного топлива и характеристике энергетических и газоочистных установок по формуле [2]

$$E_j = \sum_i E_{ji} = 10^{-6} \sum_i k_{ji} B_i \left( Q_i^r \right)_i, \text{ т/год.}$$

Это позволяет оценить риск неблагоприятного воздействия выбросов на работников предприятий, расположенных в этой зоне, и население в зависимости от применяемых котлов малой мощности. Для сравнения эффективности использования топлива и улучшения состояния окружающей среды на стадии производства тепловой энергии нами был проведен сравнительный анализ выбросов от котельных, оборудованных малоэффективными устаревшими котлами НИИСТУ-5, КПД которых не превышает 70 %, и более современного котлоагрегата Viessmann Vitoplex 100 тип PV1, имеющего КПД, равный 94 % за счет большего водонаполнения котлового блока, увеличивающего продолжительность работы горелки, что снижает частоту запусков, уменьшая негативное воздействие на окружающую среду. Помимо этого, двухходовой котел Vitoplex 100 тип PV1 характеризуется надежной и безопасной эксплуатацией благодаря использованию новейших технологических разработок компании Viessmann, применению высококачественных материалов и современных методов сварки. Ниже приведены данные о проведенной сравнительной оценке выбросов при использовании этих котлов.

Количественные значения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу (г/с, т/год) от котельной, оборудованной котлами НИИСТУ-5, приведены в табл. 1, а оборудованной котлами Viessmann Vitoplex 100 тип PV1 – в табл. 2.

Таблица 1

Объем выбросов котельной, оборудованной котлами НИИСТУ-5

| Загрязняющее вещество               | Выброс  |           |
|-------------------------------------|---------|-----------|
|                                     | г/с     | т/год     |
| Диоксид азота (NO <sub>2</sub> )    | 0,514   | 16,218    |
| Оксид углерода (CO)                 | 0,108   | 3,4       |
| Метан (CH <sub>4</sub> )            | 0,007   | 0,2       |
| Оксид диазота (N <sub>2</sub> O)    | 0,00064 | 0,02      |
| Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> ) | 374,878 | 11822,165 |

Таблица 2

Объем выбросов котельной, оборудованной котлами  
Viessmann Vitoplex 100 тип PV1

| Загрязняющее вещество               | Выброс  |          |
|-------------------------------------|---------|----------|
|                                     | г/с     | т/год    |
| Диоксид азота (NO <sub>2</sub> )    | 0,357   | 11,242   |
| Оксид углерода (CO)                 | 0,089   | 2,81     |
| Метан (CH <sub>4</sub> )            | 0,005   | 0,165    |
| Оксид диазота (N <sub>2</sub> O)    | 0,00051 | 0,016    |
| Диоксид углерода (CO <sub>2</sub> ) | 309,908 | 9773,265 |

Анализ приведенных в табл. 1 и 2 объемов выбросов вредных веществ котельными, оборудованными двумя типами котлов, показал, что выбросы диоксида азота котла НИИСТУ-5 превышают более чем в 1,4 раза объем выбросов котла Viessmann Vitoplex 100 тип PV1, выбросы других веществ (диоксида углерода, оксида углерода, метана и др.) – более чем в 1,2 раза.

**Выводы и перспективы дальнейших исследований.** Приведенные данные позволяют обосновать методологические подходы к степени оценки риска экологического загрязнения атмосферы при эксплуатации коммунальных котельных малой мощности. Установлено, что замена котлов НИИСТУ-5 на котлы Viessmann Vitoplex 100 тип PV1 позволит сократить выброс парниковых газов в атмосферный воздух на 2048,939 т/год.

### Список литературы / References

1. Двойнишников, В.А. Конструкция и расчет котлов и котельных установок / В.А. Двойнишников, Л.В. Деев, М.А. Июмов // Машиностроение. – М., 1998. – 264 с.

Dvoinishnikov V.A., Deev L.V., Iyumov M.A. *Konstruktsiya i raschyot kotlov i kotel'nykh ustanovok* [Construction and design of boilers and water-heating units]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1998, 264 p. (In Russian).

2. Соколов, Б.А. Котельные установки и их эксплуатация / Б.А. Соколов. – 2-е изд., испр. – М.: Академия, 2007. – 432 с.

Sokolov B.A. *Kotel'nye ustanovki i ikh ekspluatatsiya. 2-e izd., isp.* [Water-heating units and their operating. The 2<sup>nd</sup> revised edition]. Moscow, Academia Publ., 2007, 432 p. (In Russian).

3. Деев, Л.В. Котельные установки и их обслуживание. / Л.В. Деев, Н.А. Балахничев. – М.: Высшая школа, 1990. – 239 с.

Deev L.V., Balakhnichev N.A. *Kotel'nye ustanovki i ikh obsluzhivanie* [Water-heating units and their maintenance]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990, 239 p. (In Russian).

4. Палей, Е.Л. Проектирование котельных в секторе ЖКХ / Е.Л. Палей. – Санкт-Петербург: Газовый клуб, 2006. – 171 с.

Palei E.L. *Proektirovanie kotel'nykh v sektore ZhKKh* [Engineering of boiler stations in the field of the housing and utility infrastructure]. Sankt-Petersburg, Gazovyi klub Publ., 2006, 171 p. (In Russian).

5. Повышение эффективности работы отопительных котлов мощностью до 1 МВт / Г.П. Кучин, В.Я. Скрипко, А.И. Сигал [и др.] // Пром. теплотехника. – 2008. – Т. 30, № 2. – С. 55 – 59.

Kuchin G.P., Skripko V.Ya., Sigal A.I. [et al.]. *Povyshenie effektivnosti raboty otopitel'nykh kotlov moshhnost'yu do 1 MVt* [Enhancement of effectiveness of operation of heating boilers with capacity up to 1 MW]. *Prom. teplotekhnika – Industrial heating engineering*, 2008, vol. 30, no. 2, pp. 55-59. (In Russian).

6. Тищенко, Н.Ф. Охрана атмосферного воздуха. Расчет содержания вредных веществ и их распределение в воздухе: справ. изд. / Н.Ф. Тищенко. – М. : Химия, 1991. – 368 с.

Tishchenko N.F. *Okhrana atmosfernogo vozdukha. Raschyot sodержaniya vrednykh veshchestv i ikh raspredelenie v vozdukhe: sprav. izd.* [Atmospheric air protection. Calculation of content of noxious substances and their distribution in the air: reference book]. Moscow, Khimiya Publ., 1991, 368 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым  
Дата поступления рукописи 11.01.2022

*Anatoly Filippovich Dolzhenkov, Dr. Sci. (Tech.), deputy director (on science);*

*e-mail: dolzhenkov\_52@mail.ru;*

*Yekaterina Kairzhanovna Dzhaletova, engineer; e-mail: ekaterinajaletova@yandex.ru*

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

*Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*

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

*Anastasia Aleksandrovna Nikulina, student; e-mail: nastay93726nikulina@mail.ru*

*The State Educational Institution of Higher Occupational Education*

*“Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture”*

*286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone: (+38 071) 424-48-92*

## ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL RISK OF ATMOSPHERE POLLUTION BY EMISSIONS OF LOW-CAPACITY BOILER STATIONS

**Purpose.** Substantiation of approaches to assessment of the environmental risk of atmosphere pollution during operation of the municipal low-capacity boiler stations.

**Methods.** In solution of the assigned tasks there have been deployed analysis, generalization and systematization of calculations of values of pollutant emissions in the atmospheric air in compliance with the statutory documents that establish the procedure for determining the priority pollutants and green gases emissions that enter the atmospheric air with exhaust gases generated in the process of burning the organic fuel by the power-producing units.

**Results.** There have been considered the requirements for the assessment of the environmental risk of atmosphere pollution by the emissions of the municipal low-capacity boiler stations caused by the emission of the noxious substances into the atmosphere which are the products of natural gas incomplete combustion. It has been established that the replacement of the НИИСТУ-5 boilers with the Viessmann Vitoplex 100 PV1 type boilers will make it possible to reduce the green gasses emission into the atmospheric air.

**Scientific novelty.** The methodological approaches to the assessment of the environmental risk of atmosphere pollution by operating municipal low-capacity boiler stations have been substantiated. The mathematical models for assessment of the environmental risk of atmosphere pollution by emissions of the low-capacity boiler stations have been derived.

**Practical value.** The obtained results will make it possible to substantiate the consumption rate and the composition of the used fuel and the characteristics of power and gas-cleaning units, and to assess the quantity values of the emitted pollutants into the atmosphere by the boiler stations equipped with the low-capacity boilers.

**Keywords:** *sources of heat supply; low-capacity boiler stations; hot water boilers; environmental risk; hazardous and noxious chemical substances.*

УДК [614.84-051:612.55:614.895.5]:001.891.572

*Татьяна Викторовна Князева, руководитель аппарата министра; e-mail: mchs-dnr@mail.ru  
Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям  
и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР*

*283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел.: (+38 062) 340-62-80*

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

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

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

## ТРЕХМЕРНАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ ПОЖАРНОГО В УСЛОВИЯХ ПОВЫШЕННЫХ ТЕМПЕРАТУР

**Цель.** Разработать адекватную трехмерную физическую модель теплового состояния пожарного в специальной защитной одежде от повышенных тепловых воздействий и определить параметры этой модели для анализа и прогнозирования предельного времени работы пожарного при воздействии опасных факторов пожара.

**Методы.** Для определения параметров физической модели использован расчетно-экспериментальный подход – метод определения недостаточно изученных параметров модели путем их идентификации по данным экспериментов либо литературных источников.

**Результаты.** Разработана трехмерная физическая модель теплового состояния организма пожарного в специальной защитной одежде от повышенных тепловых воздействий. Представлены основные допущения, процессы и исходные данные модели. Параметры модели определены по данным литературных источников и экспериментальных исследований теплового состояния пожарного.

**Научная новизна.** Построение усовершенствованной физической модели теплового состояния человека, параметры которой определяются по эксперименту, проведенному при комнатной температуре, которые затем используются для определения теплового состояния пожарного во время выполнения им функциональных обязанностей при повышенных температурах окружающей среды.

**Практическая значимость.** Для усовершенствования средств индивидуальной защиты внедрение модели оценки теплового состояния пожарного при выполнении работ повысит эффективность специальной защитной одежды от повышенных тепловых воздействий.

**Ключевые слова:** *тепловое состояние пожарного; специальная защитная одежда пожарных от повышенных тепловых воздействий; опасные факторы пожара; средства индивидуальной защиты; моделирование.*

**Постановка задачи.** Работа пожарного связана со значительной опасностью для его жизни и здоровья. Опасные факторы пожара, такие как повышенная температура и падающий тепловой поток, обязывают пожарных использовать средства индивидуальной защиты, в число которых входит специальная защитная одежда от повышенных тепловых воздействий (далее – СЗО ПТВ). В данной работе моделируется нестационарное тепловое состояние пожарного в СЗО ПТВ в условиях действия опасных факторов пожара.

**Анализ последних исследований.** Анализ литературы показал, что существует ряд работ, посвященных разработке моделей теплового состояния человека, которые отличаются между собой назначением, степенью детализации представления человеческого тела, а также учитываемыми в модели процессами.

Наиболее простые модели, например представленные в работах [1, 2], имеют слабую детализацию и не учитывают такие физиологические процессы, как кровообращение, дыхание, изменение тепловыделения в зависимости от физической нагрузки, потоотделение. Более сложные модели, в частности представленные в работах [3, 4], учитывают часть этих процессов и имеют степень детализации, зависящую от конкретных целей той или иной модели. Как правило, такие модели состоят из цилиндрических сегментов и представляют основные тепловые процессы, однако не учитывают процессы терморегуляции и физиологические изменения при меняющихся тепловых условиях. Модель, рассмотренная в работе [5], – одна из наиболее сложных, состоит из 51 расчетного узла, каждый из которых представляет ту или иную часть человеческого организма, при этом учитывается наличие кровеносной системы, внутренних органов, наружных покровов, кожи и т.д. Это модель со сосредоточенными параметрами, в которой каждый узел представляет тот или иной объем пожарного и защитной одежды.

Анализ условий пожаротушения [6] показал, что температура в помещении, где возник пожар на момент локализации, может составлять до 700...900 °С, плотность теплового потока до 20...45 кВт/м<sup>2</sup>, при этом предельно допустимые значения опасных факторов пожара, действующих на человека, составляют 70 °С и 1,5 кВт/м<sup>2</sup>. Предельное время работы пожарного ограничивается временем появления ожогов вследствие действия вышеописанных опасных факторов пожара, а также повышением внутренней температуры тела человека (так называемого теплового ядра) выше критического уровня. Для увеличения безопасности крайне важно знать предельное время работы пожарного в тех или иных условиях тушения пожара и не допустить его превышения. Предельное время зависит от характеристик СЗО ПТВ (материал, толщина слоев), температуры, влажности и скорости обдува костюма окружающим воздухом, а также от тяжести выполняемой работы.

В отличие от критической температуры «теплового ядра», определенной ниже, будем использовать условное понятие нормальной температуры «теплового ядра», под которым подразумевается температура внутренних органов здорового человека в состоянии покоя, который не был подвержен перегреву либо переохлаждению, и имеющая значение 37,0...37,5 °С. При перегреве вследствие физической нагрузки внутренняя температура может существенно повышаться. В работах [7, 8] показано, что при выполнении спортивных упражнений или нормативов при достаточно широком разнообразии видов нагрузок внутренняя температура тела повышается до 38,5 °С, а в случаях больших нагрузок – до 38,8...39,1 °С или даже выше. При этом повышение температуры до уровня 38,8...39,1 °С может считаться даже желательным, так как приводит к ускорению метаболизма и повышению физических показателей. Дальнейшее же повышение внутренней температуры приводит к снижению физических показателей и опасности для здоровья и жизни. Такой уровень температуры «теплового ядра», при котором состояние человека ухудшается

и возникает опасность для его здоровья и жизни, назовем критической температурой «теплового ядра», значение которой примем равным 39,0 °С. Следует отметить, что температура поверхности тела (поверхностного слоя) не играет существенной роли и может значительно отличаться от температуры «ядра». Само же понятие «тепловое ядро» условно, так как оно не имеет постоянных границ расположения и его размеры могут существенно варьироваться в зависимости от условий окружающей среды.

Обзор существующих работ показывает, что актуальна разработка таких расчетных методов и моделей теплового состояния организма пожарного в СЗО ПТВ, которые позволили бы оценивать время его работы в костюме в зависимости от уровней физической нагрузки и температурных условий среды, в которой он работает. Для решения такой задачи необходимы адекватная модель теплового состояния организма пожарного в СЗО ПТВ и методика определения параметров этой модели.

**Цель исследования** – создать трехмерную физическую модель теплового состояния пожарного в специальной защитной одежде от повышенных тепловых воздействий и определить параметры этой модели для анализа и прогнозирования предельного времени работы пожарного при воздействии опасных факторов пожара.

**Изложение основного материала.** Физическая модель содержит объемы «теплового ядра», поверхностного слоя, а также слои защитного костюма. Такой вид модели позволяет учесть неравномерность температуры различных частей тела, а также влияние начального распределения температур на тепловое состояние организма. Модель тела пожарного состоит из «теплового ядра», имеющего ответвления, уходящие в руки и ноги, за счет чего может создаваться эффект ускоренного переноса теплоты крупными кровеносными сосудами, проходящими в конечностях. Модель тела пожарного содержит также поверхностный слой, через который происходит теплообмен «ядра» с костюмом и окружающей средой. Подкостюмное пространство и нательная одежда учитываются в модели как термическое сопротивление на поверхности контакта объемов костюма и поверхностного слоя тела.

**Результаты исследования.** В разрабатываемой физической модели учитываются метаболическое тепловыделение  $Q_m$ , Вт, мышечное тепловыделение  $Q_{мыш}$ , Вт, тепловые потери на обогрев и увлажнение выдыхаемого воздуха  $Q_{дых}$ , Вт, отвод теплоты через поверхность костюма  $Q_{пов}$ , Вт, теплота, отдаваемая потоотделением,  $Q_{пот}$ , Вт, которая для случая моделирования человека в костюме может снижаться до минимума, так как пот не может испаряться из-за плотного герметически закрытого подкостюмного пространства.

Количество метаболической теплоты  $Q_{мет}$ , Вт, зависит от вида физической активности и приводится в ряде литературных источников. Часть этой теплоты идет на изменение температуры тела, часть –  $Q_{дых}$  – на подогрев вдыхаемого воздуха, а оставшаяся часть передается поверхности организма, а затем поступает в окружающую среду. В реальности процесс теплообмена

через ткани организма осуществляется в основном за счет переноса теплоты с циркулирующей кровью, однако в модели такой теплообмен представлен кондуктивным теплообменом через объем поверхностного слоя тела, при этом коэффициент теплопроводности – функция температуры «теплового ядра», что подробнее описано ниже.

Метаболическое тепловыделение задается как распределенное тепловыделение в объеме «теплового ядра» модели. Из этого тепловыделения вычитается теплота, теряемая организмом с дыханием. Мышечное тепловыделение  $Q_{\text{мыш}}$  также задается объемным источником тепловыделения в поверхностном слое объема тела. Ниже приведены значения тепловыделения в ядре и поверхностном слое тела в зависимости от интенсивности нагрузки (табл. 1). Разделение полного тепловыделения на метаболическую и мышечную части – одно из допущений модели. Считается, что в покое мышечное тепловыделение равно нулю, а все метаболическое тепловыделение происходит в «тепловом ядре». С увеличением нагрузки до среднего и тяжелого уровня метаболическое тепловыделение несколько усиливается, а мышечное тепловыделение составляет остающуюся часть полного тепловыделения.

Таблица 1

Уровни тепловыделения в ядре и объеме тела  
в зависимости от интенсивности нагрузки

| Вид нагрузки     | Полное тепловыделение, Вт | Тепловыделение в ядре, Вт | Тепловыделение в поверхностном слое тела, Вт |
|------------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------------------------|
| Покой            | 150                       | 150                       | 0                                            |
| Легкая нагрузка  | 500                       | 150                       | 350                                          |
| Средняя нагрузка | 600                       | 200                       | 400                                          |
| Тяжелая нагрузка | 700                       | 200                       | 500                                          |

В стационарном состоянии сумма рассмотренных выше тепловыделения и теплостоков равна нулю, что может быть записано как тепловой баланс человеческого тела

$$Q_{\text{м}} + Q_{\text{мыш}} + Q_{\text{дых}} + Q_{\text{пов}} + Q_{\text{пот}} = 0. \quad (1)$$

Если сумма в левой части выражения (1) положительна, то организм перегревается из-за превышения тепловыделения над теплопотерями, если же она отрицательна, то тело будет, наоборот, охлаждаться.

Для разработки данной модели были приняты следующие средние физические параметры человека: рост  $h = 175$  см, вес  $m = 75$  кг, площадь поверхности тела  $2 \text{ м}^2$ . Характеристики основных объемов тела, принятые в модели, представлены ниже (табл. 2).

Таблица 2

## Объемы и теплофизические свойства частей тела

| Название частей объема тела | Объем, м <sup>3</sup> | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Теплоемкость, кДж/(кг·К) | Теплопроводность, Вт/(м·с) |
|-----------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------|
| «Тепловое ядро»             | 0,024                 | 1000                         | 3500                     | 400                        |
| Поверхностный слой тела     | 0,074                 | 1000                         | 3500                     | $f(t_я)$                   |

Трехмерное уравнение теплопроводности описывает теплообмен в «тепловом ядре», в поверхностном слое тела человека и в слоях защитного костюма

$$c\rho \frac{\partial t}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial t}{\partial z} \right) + Q_v, \quad (2)$$

где  $c$ ,  $\rho$  и  $\lambda$  – теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности объемов тела и слоев костюма, зависящие от координат границ слоев защитной одежды, а также в некоторых случаях от температуры  $t$ ;

$Q_v$  – источник внутренней теплоты, Вт.

Данное уравнение решается численно с применением метода конечных объемов [9], для этого расчетная геометрическая область разбивается на необходимое количество расчетных ячеек. В представленной модели расчетная сетка модели состояла из 7 тыс. ячеек.

На наружной поверхности с температурой  $t_{пов}$ , °С, в направлении нормали  $n$  к поверхности модели заданы совмещенные конвективно-радиационные граничные условия теплообмена с окружающей средой, имеющей температуру  $t_{ос}$ , °С, [10]

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial x} = q_{конв} + q_{рад}, \quad (3)$$

$$\text{где } q_{конв} = \alpha(t_{пов} - t_{ос}), \quad (4)$$

$$q_{рад} = 5,67\varphi\xi \left[ \left( \frac{t_{пов}+273}{100} \right)^4 + \left( \frac{t_{ос}+273}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

$\alpha$  – коэффициент теплоотдачи принят равным 5 Вт/(м<sup>2</sup>/К);

$\xi$  – степень черноты – 0,7;

$\varphi$  – угловой коэффициент – 1.

Граничные условия на наружной поверхности кожи, не покрытой защитным костюмом, имеют следующий вид:

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial n} = q_{конв} + q_{рад} + q_{по}, \quad (6)$$

где  $q_{\text{по}}$  – тепловой поток, который учитывает отвод теплоты при испарении пота на наружной поверхности тела, Вт.

Таким образом, величина коэффициента теплопроводности поверхностного слоя регулирует теплообмен между тканями тела за счет усиления кровообращения при перегреве и является одним из главных управляющих параметров рассматриваемой части модели для терморегуляции человеческого организма.

В рассматриваемой модели механизм терморегуляции реализован с помощью алгоритма управления коэффициентом теплопроводности  $\lambda_{\text{пс}}$  поверхностного слоя, величина которого изменяется так, чтобы поддерживать температуру ядра на постоянном нормальном уровне. Алгоритм основывается на том, что, когда температура теплового ядра становится выше нормального уровня  $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  вследствие выполнения работы и/или повышения температуры окружающей среды, величина  $\lambda_{\text{пс}}$  также повышается, что приводит к уменьшению термического сопротивления поверхностного слоя и, следовательно, к снижению температуры «теплового ядра»  $t_{\text{я}}$ , и, наоборот, при снижении температуры «теплового ядра» снижается и  $\lambda_{\text{пс}}$ , что приводит к увеличению  $t_{\text{я}}$ . Таким образом, алгоритм управления в каждый момент времени нестационарного состояния организма ищет такое значение  $\lambda_{\text{пс}}$ , которое обеспечивает температуру «теплового ядра» на комфортном уровне (в данном случае  $37,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) в пределах отклонения  $\delta = \pm 0,05\text{ }^{\circ}\text{C}$

$$(37,0 - \delta) \geq t_{\text{я}} \geq (37,0 + \delta). \quad (7)$$

Работа алгоритма в модели реализована следующим образом.

При нахождении  $t_{\text{я}}$  в диапазоне комфортных значений, то есть при выполнении условия (7),  $\lambda_{\text{пс}}$  не изменяется во времени

$$\frac{d\lambda_{\text{пс}}}{d\tau} = 0.$$

При превышении температуры ядра  $t_{\text{я}}$  до комфортного уровня (7) коэффициент теплопроводности поверхностного слоя  $\lambda_{\text{пс}}$  увеличивается таким образом, чтобы уменьшить температуру ядра и выполнить условие (7), при этом скорость изменения  $\lambda_{\text{пс}}$  не может превышать некоторую величину  $V_{\text{max}}$

$$\frac{d\lambda_{\text{пс}}}{d\tau} > 0; \quad \left| \frac{d\lambda_{\text{пс}}}{d\tau} \right| < V_{\text{max}}. \quad (8)$$

$V_{\text{max}}$  зависит от конкретного значения  $\lambda_{\text{пс}}$

$$V_{\text{max}} = 0,2 \lambda_{\text{пс}} / 30. \quad (9)$$

Если путем увеличения  $\lambda_{\text{пс}}$  не удастся выполнить условие (7), что может быть при повышенной температуре среды или большой физической нагрузке, то  $\lambda_{\text{пс}}$  продолжает увеличиваться со временем при соблюдении условий (8) – (9). При снижении температуры среды и/или нагрузки температура тела будет снижаться до нормального уровня, а затем вновь поддерживаться на нормальном уровне за счет подобранной величины  $\lambda_{\text{пс}}$ .

Аналогично для случая, когда температура ядра по разным причинам становится ниже комфортного уровня, значение  $\lambda_{\text{пс}}$  уменьшается сильнее

$$\frac{d\lambda_{\text{пс}}}{d\tau} < 0; \left| \frac{d\lambda_{\text{пс}}}{d\tau} \right| < V_{\text{max}}.$$

Значение  $\lambda_{\text{пс}}$  должно быть не больше некоего максимального уровня  $\lambda_{\text{псmax}}$

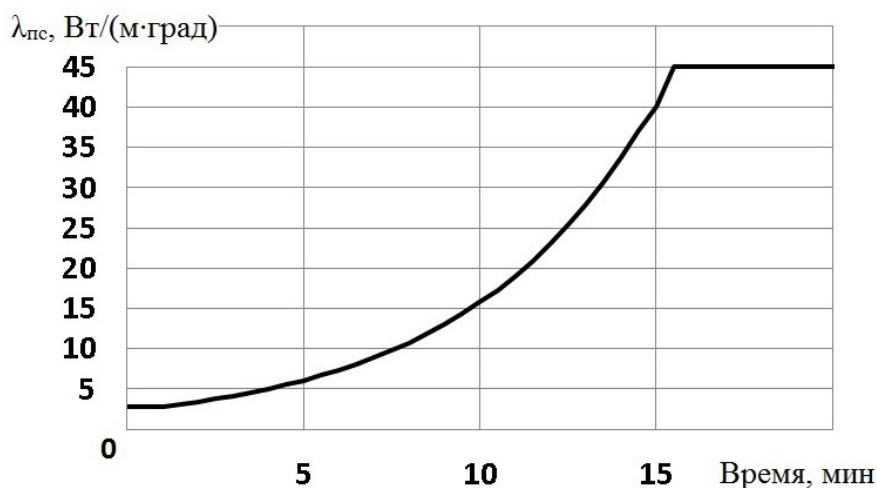
$$\lambda_{\text{пс}} \leq \lambda_{\text{псmax}}.$$

В ходе идентификации параметров  $\lambda_{\text{псmax}}$  было выбрано равным 45...50 Вт/(м·град), что обеспечивает хороший теплообмен между тканями тела и достаточную равномерность температуры в его объеме.

При численном решении уравнений математической модели (1) – (6) на каждом шаге по времени итерационным методом последовательных приближений находится такое  $\lambda_{\text{пс}}$ , которое обеспечивает выполнение условия (7). Таким образом, в модели учитывается ускорение кровообращения при повышении нагрузки, что приводит к более интенсивному переносу теплоты от внутренних органов и мышц организма к его поверхности.

Приведенный выше алгоритм является алгоритмом пропорционального регулирования величины  $\lambda_{\text{пс}}$  для выполнения критерия регулирования (7). Он избавляет от необходимости подбирать зависимость  $\lambda_{\text{пс}}$  от температуры для каждого конкретного случая.

Так, для человека в СЗО ПТВ для условий моделирования при температуре окружающей среды 40 °С ниже представлены зависимость теплопроводности поверхностного слоя тела от времени и детальное поле температур в плоскости симметрии (см. рисунок). Значения  $\lambda_{\text{пс}}$  во времени растут вследствие повышения внутреннего тепловыделения в теле при средней нагрузке и после некоторого времени становятся постоянными, что приводит к перегреву организма. Для других меняющихся условий физической нагрузки пожарного, температур окружающей среды и типов костюмов в динамике коэффициент теплопроводности поверхностного слоя  $\lambda_{\text{пс}}$  будет качественно подобным, но количественно может быть другим.



Зависимость теплопроводности поверхностного слоя тела пожарного от времени

**Выводы.** Разработана трехмерная физическая модель теплового состояния пожарного в СЗО ПТВ, учитывающая основные механизмы теплообмена и терморегуляции человеческого организма и защитного костюма. Для построения модели использовались три параметра: теплоемкость, плотность и коэффициент теплопроводности тела человека и слоев защитного костюма. Тепловое состояние пожарного регулируется за счет изменения теплопроводности защитной одежды.

#### Список литературы / References

1. Stolwijk, J.A.J., Hardy, J.D. A mathematical model of physiological temperature regulation in man, NASA SR – 1855. Yale University School of Medicine, New Haven, Connecticut 06510. August 1971, 70 p.

2. Ермакова, И.И. Исследование динамических процессов в системе терморегуляции человека методом цифрового моделирования: дис. ... канд. техн. наук / И.И. Ермакова. – Киев, 1974. – 162 с.

Ermakova I.I. *Issledovanie dinamicheskikh protsessov v sisteme termoregulyatsii cheloveka metodom tsifrovogo modelirovaniya: dis. ... kand. tekhn. nauk / I.I. Ermakova* [Investigation of dynamic processes in human thermoregulation system by digital simulation method : Cand. tech. sci. diss. abstract]. Kiev, 1974, 162 p. (In Russian).

3. Черунова, И.В. Математическое моделирование в рамках гибкого проектирования теплозащитной одежды / И.В. Черунова // Швейная промышленность. – М., 2006. – № 5. – С. 37 – 38.

Cherunova I.V. *Matematicheskoe modelirovanie v ramkakh gibkogo proektirovaniya teplozashhitnoi odezhdyy* [Mathematical modeling within the framework of heat-protective clothing flexible design]. *Shveinaya promyshlennost' – Clothing industry*, Moscow, 2006, no. 5, pp. 37-38. (In Russian).

4. Галузо, Ю.А. Аспекты математических моделей теплового обмена с телом человека / Ю.А. Галузо, И.В. Черунова, И.В. Куренова // Современные наукоемкие технологии. – 2013. – № 8 (ч. 1). – С. 30 – 31.

Galuzo Yu.A., Cherunova I.V., Kurenova I.V. *Aspekty matematicheskikh modelei teplovogo obmena s telom cheloveka* [Aspects of mathematical models of thermal exchange with human body]. *Sovremennye naukoymkie tekhnologii – Modern science-driven technologies*, 2013, no. 8 (part 1), pp. 30-31. (In Russian).

5. Курмазенко, Е.А. Подробная имитационная модель системы терморегуляции организма человека. Шестой Европейский симпозиум по системам контроля космической среды, Нордвейк, Нидерланды, 20–22 мая 1997 г. / Е.А. Курмазенко // Европейское космическое агентство. Системы контроля космической среды. – 1997. – С. 815 – 821.

Kurmazenko, E.A. *Podrobnaya imitatsionnaya model' sistemy termoregulyatsii organizma cheloveka. Shestoi Evropeiskii simpozium po sistemam kontrolya kosmicheskoi sredy, Nordveik, Niderlandy, 20-22 maya 1997 g.* [A detailed simulation model of the human organism thermoregulation system. The Sixth European Symposium on Space Environmental Control Systems, Noordwijk, Netherlands, 20–22 May, 1997]. *Evropeiskoe kosmicheskoe agentstvo. Sistemy kontrolya kosmicheskoi sredy – European Space Agency. Systems of space monitoring*, 1997, pp. 815-821. (In Russian).

6. Бобков, С.А. Физико-химические основы развития и тушения пожаров / С.А. Бобков, А.В. Бабурин, П.В. Комраков. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2014. – 210 с.

Bobkov S.A., Baburin A.V., Komrakov P.V. *Fiziko-khimicheskie osnovy razvitiya i tusheniya pozharov* [Physicochemical principles of development and extinguishment of fires]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Press, 2014, 210 p. (In Russian).

7. Павлов, А.С. Термофизиология мышечной работы и спортивного стресса: монография / А.С. Павлов. – Донецк: ДонНУ, 2007. – 79 с.

Pavlov A.S. *Termofiziologiya myshechnoi raboty i sportivnogo stressa: monografiya* [Thermal physiology of muscle work and sport stress: monograph]. Donetsk, DonNU Press, 2007, 79 p. (In Russian).

8. Skein M., Duffield R., Cannon J. [et al.]. Self-paced intermittent-sprint performance and pacing strategies following respective pre-cooling and heating // The European Journal of Applied Physiology, 2012, № 112(1), pp. 253 – 266.

9. Егоров, В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности / В.И. Егоров. – СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.

Egorov V.I. *Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploprovodnosti* [Application of Electronic Computing Machine for solution of heat conductivity problems]. Saint Petersburg, SPb GU ITMO Press, 2006, 77 p. (In Russian).

10. Болибрух, Б.В. Развитие научных основ создания высокоэффективных средств индивидуальной защиты пожарного: дис. ... канд. техн. наук / Б.В. Болибрух. – Покровск, 2017. – 200 с.

Bolibrukh B.V. *Razvitie nauchnykh osnov sozdaniya vysokoeffektivnykh sredstv individual'noi zashhity pozharnogo: dis. ... kand. tekhn. nauk* [Development of scientific fundamentals for creation of highly effective personal protective equipment of firefighter protection: Cand. tech. sci. diss. abstract]. Pokrovsk, 2017, 200 p. (In Russian).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым  
Дата поступления рукописи 04.02.2021

*Tatyana Viktorovna Knyazeva, head of Minister's office; e-mail: mchs-dnr@mail.ru*  
*The Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences*  
*of Natural Disasters of the Donetsk People's Republic*  
*283050, Donetsk, 60, ulitsa Shhorsa. Phone: (+38 062) 340-62-80*  
*Tatyana Olegovna Moroz, advanced engineer; e-mail: tatiana.moroz@rambler.ru*  
*The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,*  
*Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR*  
*283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-43*

### THREE-DIMENSIONAL MODEL OF FIREFIGHTER'S BODY THERMAL STATUS IN CONDITIONS OF ELEVATED TEMPERATURES

**Purpose.** To develop an adequate three-dimensional physical model of the firefighter's body thermal status in the special clothing for protection against heat and to determine the parameters of this model for analysis and prediction of the maximum working time limit for the firefighter under exposure of hazardous fire factors.

**Methods.** In order to define the physical model parameters the computational-experimental approach, i.e. the method for determining insufficiently studied model parameters by identifying them according to the data of the experiments or of the literature sources has been employed.

**Results.** The three-dimensional physical model of the body thermal status of the firefighter in the special clothing for protection against heat has been developed. The principal assumptions, the processes and the source data of the model have been presented. The parameters of the model have been determined according to the data of the literature sources and the experimental investigations of the firefighter's body thermal status.

**Scientific novelty.** Design of the improved physical model of the human body thermal status with parameters determined by the experiment conducted at the room indoor temperature and then applied for determining the firefighter's body thermal status during his performance of the functional responsibilities at the elevated temperatures of the environment.

**Practical value.** For improvement of the personal protective equipment the implementation of the assessment model of the firefighter's body thermal status during carrying-out of the works will enhance the effectiveness of the special clothing for protection against heat.

**Keywords:** *firefighter's body thermal status; special clothing for firemen protection against heat; hazardous fire factors; personal protective equipment; modeling.*

УДК 614.894.7:[544.723:661.183"ХП-И"]

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

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

*Виктор Иванович Францев, вед. инж.; e-mail: oszd\_niigd\_3@mail.ru*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-45*

## **ВЛИЯНИЕ ФРАКЦИОННОГО СОСТАВА И ВЫСОТЫ СЛОЯ ПОГЛОТИТЕЛЯ ХП-И НА ЕГО СОРБЦИОННУЮ ЕМКОСТЬ**

**Цель.** Повышение сорбционной емкости химического поглотителя известкового ХП-И для защитных дыхательных аппаратов.

**Методы.** Экспериментальные методы исследований химических поглотителей.

**Результаты.** Установлены зависимости сорбционной емкости химического поглотителя известкового ХП-И от высоты слоя сорбента в регенеративном патроне и гранулометрического состава.

**Научная новизна.** Впервые определены значения высоты слоя химического поглотителя известкового ХП-И в регенеративном патроне и его гранулометрический состав для оптимизации сорбции.

**Практическая значимость.** Полученные результаты исследований позволят оптимизировать параметры конструкции дыхательных аппаратов, уменьшая массу используемого сорбента и повышая их защитную способность.

**Ключевые слова:** известковый химический поглотитель; дыхательный аппарат; защитная способность; сорбция; сорбент; диоксид углерода; фракционный состав.

**Постановка проблемы.** Во многих дыхательных аппаратах, применяемых в настоящее время для защиты органов дыхания работников, используют в качестве сорбента диоксида углерода известковый химический поглотитель ХП-И. Его качество регламентировано требованиями ГОСТ 6755–88 «Поглотитель химический известковый ХП-И. Технические условия».

Свойства поглотителя определяют тактико-технические характеристики дыхательных аппаратов, сконструированных для использования его в своем составе. Усовершенствование дыхательных аппаратов связано с улучшением свойств поглотителей, однако данный путь длительный и требует значительных материальных затрат, поэтому актуально совершенствование дыхательных аппаратов без необходимости разработки новых типов химических поглотителей.

**Анализ последних исследований.** Для улучшения тактико-технических характеристик дыхательных аппаратов разрабатывают новые сорбенты, которые имеют высокие сорбционные емкости и скорости поглощения, одновременно сохраняя стабильность пористой структуры, форму

и механическую прочность в процессе эксплуатации [1]. Это, например, сорбенты, композиционные материалы которых состоят из активного компонента и полимерного связующего, что позволяет придавать поглотителю необходимую форму, обеспечивает прочность и гибкость, удерживает активные частицы, исключая их миграцию.

В последнее время в Тамбовском государственном техническом университете создан и исследован на предмет сорбционных свойств и кинетики хемосорбции диоксида углерода композиционный материал в виде гибкого листа толщиной  $0,9 \pm 0,1$  мм, содержащий в качестве сорбента смесь порошка гидроксида кальция и полимер, состоящий из фторопласта Ф-42 и поливинилового спирта. Также создан композиционный хемосорбент в виде волокна диаметром  $1,0 \pm 0,3$  мкм. Активное вещество данного волокна получено в результате смешения гидроксида кальция и раствора фторопласта.

Испытания листового композиционного хемосорбента в составе патрона изолирующего дыхательного аппарата в пульсирующем потоке газовой смеси на стенде – имитаторе дыхания человека показали увеличение сорбционной емкости, превысившей в 1,2...1,5 раза характеристики применяемых поглотителей [2].

Исследования по получению смешанного химического поглотителя, состоящего из гидроксида кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и гидроксида лития  $\text{LiOH}$ , позволили установить, что динамическая сорбционная емкость зависит от соотношения этих компонентов. Максимальное значение ее в образцах, содержащих 20...30 масс. % гидроксида лития, при этом составило  $44 \text{ см}^3/\text{г}$ , что в 3,1 раза выше емкости ХП-И промышленного состава [3].

Совершенствование дыхательных аппаратов с существующими сорбентами диоксида углерода возможно путем вариации их гранулометрического состава, размещая фракции сорбента слоями [4], а также изменяя конструкции отдельных элементов регенеративного патрона – основного компонента регенеративного дыхательного аппарата, определяющего его защитные свойства.

Таким образом, существуют различные пути совершенствования дыхательных аппаратов, в том числе и разработка новых видов сорбентов диоксида углерода. Однако последнее не всегда оправданно из-за высокой стоимости разработки и отсутствия промышленного производства.

**Результаты исследований.** Конструкция регенеративного патрона должна обеспечивать максимальную сорбционную емкость поглотителя, но для обеспечения низкого сопротивления патрона потоку воздуха на высоту слоя сорбента и на размер его гранул накладываются ограничения. Следовательно, требуется найти оптимальное соотношение между массой заряда сорбента, размером его гранул и высотой слоя сорбента для патронов с различным временем защитного действия и условиями эксплуатации.

Исследовано влияние размера гранул, высоты рабочего слоя патрона и скорости проходящего через него воздуха на сорбционную емкость известкового химического поглотителя ХП-И. Исследования проводили на динамической установке с искусственными лёгкими (стенде – имитаторе дыхания). В патрон поступал воздух температурой 36...37 °С, насыщенный парами влаги, с содержанием диоксида углерода 3,9...4,1 %. Исходя из реальных размеров регенеративных патронов, их возможных сечений и диапазона дыхательных нагрузок в респираторе, удельная скорость потока воздуха составляла 0,13...0,64 дм<sup>3</sup>/(мин·см<sup>2</sup>). Регенеративный патрон диаметром 100 мм с высотой слоя поглотителя 50 и 150 мм при его массе соответственно 0,34 и 1,02 кг снаряжали сорбентом одной партии изготовления, но различной грануляции (4, 3 и 2 мм). Испытания проводили до проскока СО<sub>2</sub>, равного 1 и 2 %. Результаты испытаний (рис. 1 – 4, табл. 1 и 2) показали, что уменьшение размера гранул поглотителя, увеличение высоты его слоя и уменьшение скорости однонаправленно проходящего через патрон воздуха влияют на сорбционную емкость известкового химического поглотителя ХП-И, способствуя ее увеличению.

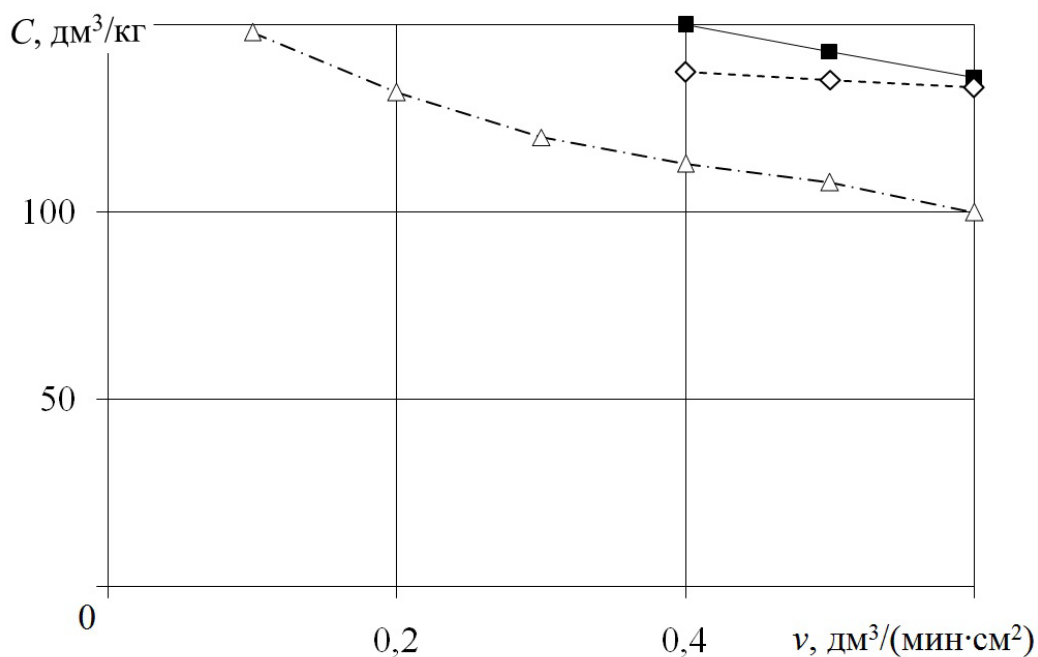


Рис. 1. Зависимость сорбционной емкости  $C$  поглотителя ХП-И от удельной скорости потока воздуха  $v$  при допустимом проскоке СО<sub>2</sub> на уровне 2 % и высоте слоя 150 мм при разных значениях размера гранул:  
 —■— 2 мм; —◇— 3 мм; —△— 4 мм

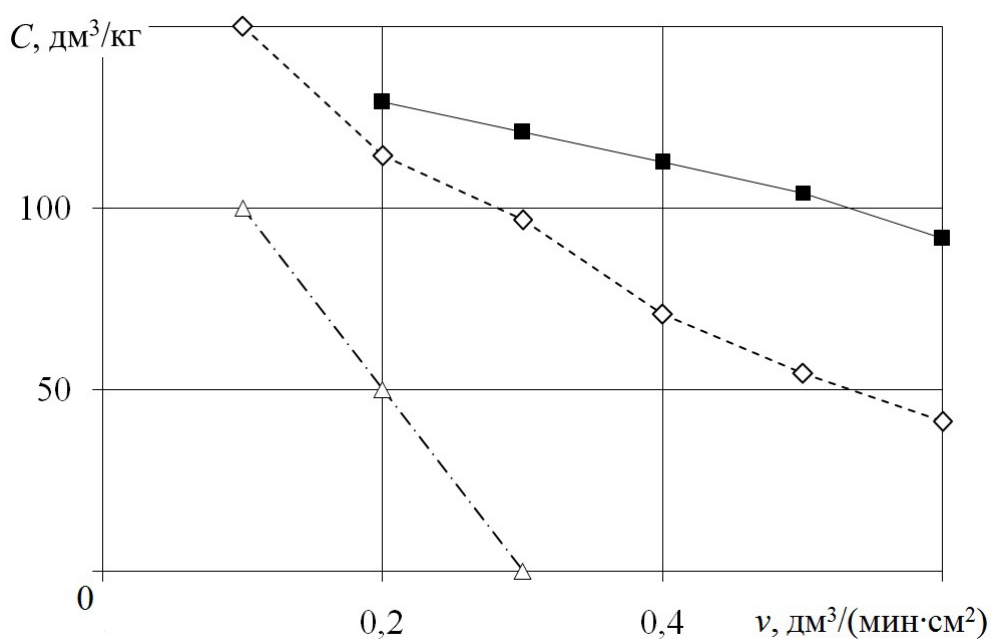


Рис. 2. Зависимость сорбционной емкости  $C$  поглотителя ХП-И от удельной скорости потока воздуха  $v$  при допустимом проскоке  $\text{CO}_2$  на уровне 2 % и высоте слоя 50 мм при разных значениях размера гранул:  
 —■— 2 мм; —◇— 3 мм; —·—△—·— 4 мм

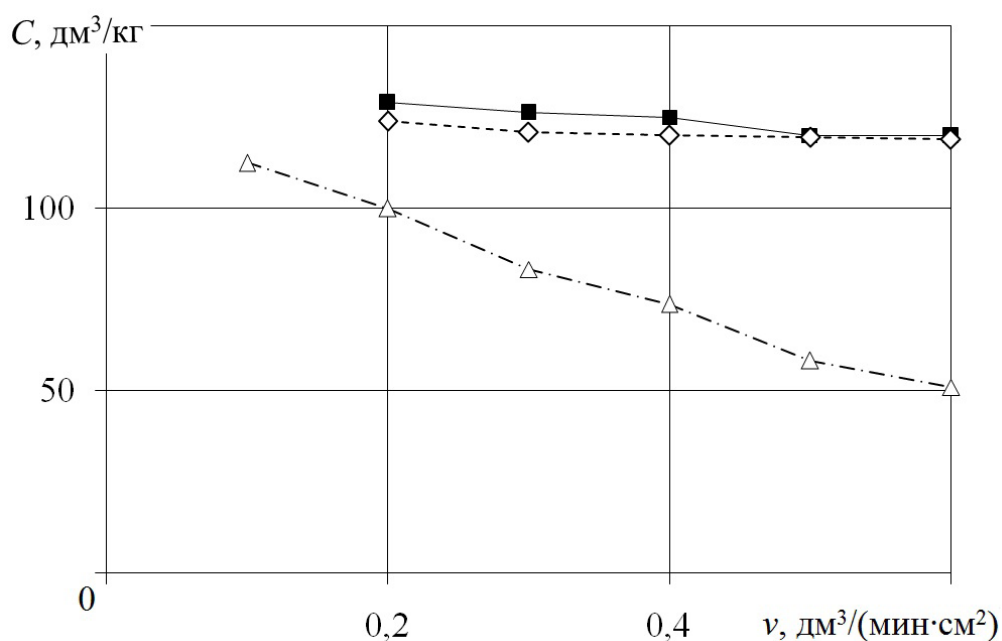


Рис. 3. Зависимость сорбционной емкости  $C$  поглотителя ХП-И от удельной скорости потока воздуха  $v$  при допустимом проскоке  $\text{CO}_2$  на уровне 1 % и высоте слоя 150 мм, при разных значениях размера гранул:  
 —■— 2 мм; —◇— 3 мм; —·—△—·— 4 мм

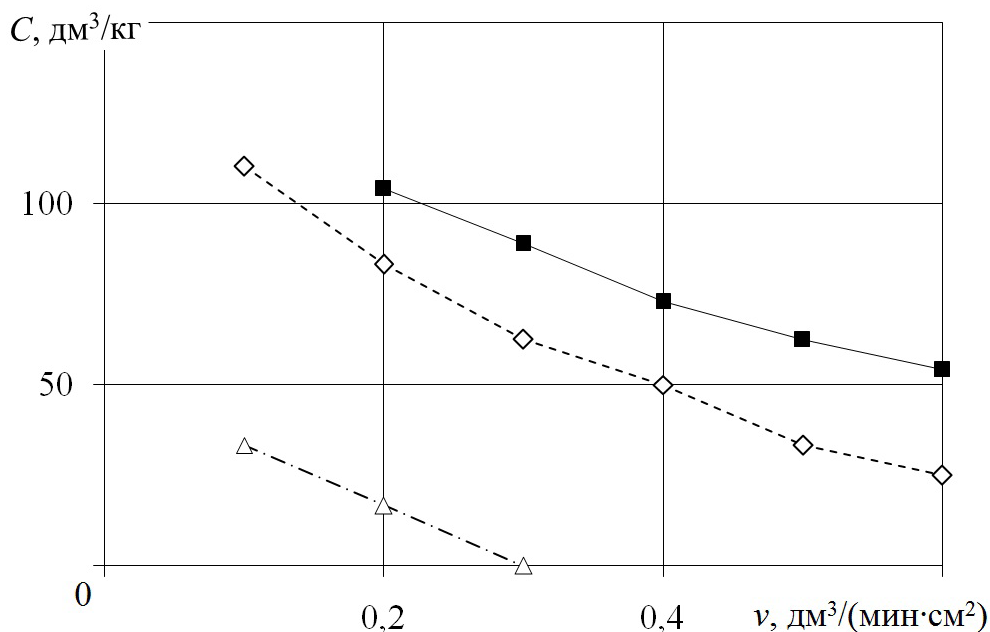


Рис. 4. Зависимость сорбционной емкости  $C$  поглотителя ХП-И от удельной скорости потока воздуха  $v$  при допустимом проскоке  $\text{CO}_2$  на уровне 1 % и высоте слоя 50 мм при разных значениях размера гранул:  
 —■— 2 мм; —◇— 3 мм; —△— 4 мм

Ввиду того, что регенеративные патроны применяемых аппаратов имеют ограниченные размеры, при большинстве дыхательных нагрузок сорбент работает в неустойчивом режиме, при котором не достигается прямолинейной зависимости между временем защитного действия слоя хемосорбента и его высотой. Поэтому сорбционная емкость поглотителя ХП-И изменяется в широких пределах в зависимости от размеров патрона и величины дыхательной нагрузки. Так, при использовании поглотителя ХП-И фракции 4 мм снижение высоты слоя сорбента или увеличение скорости воздуха, проходящего через патрон, существенно уменьшает сорбционную емкость поглотителя. При этом влияние скорости воздуха на величину сорбционной емкости ХП-И заметнее при уменьшении высоты слоя поглотителя. При использовании ХП-И фракции 3 или 2 мм влияние высоты слоя сорбента и скорости воздуха на его сорбционную емкость не так велико, как в первом случае. Наиболее заметно изменяется сорбционная емкость ХП-И в патронах с малым зарядом поглотителя. При массе заряда 0,34 кг (высота слоя 50 мм) с фракцией 4 мм практически не обеспечивается поглощение диоксида углерода: во всем диапазоне испытанных скоростей воздуха проскок  $\text{CO}_2$ , превышающий 1 %, наступает с первых минут работы патрона, в то время как при применении фракции 2 мм (при таком же заряде и высоте слоя) сорбционная емкость составляет более 100  $\text{дм}^3/\text{кг}$ . С увеличением высоты слоя ХП-И до 150 мм удовлетворительно работает даже поглотитель фракции 4 мм.

Таблица 1

Сорбционная емкость поглотителя ХП-И при работе его  
в регенеративном патроне до проскока  $\text{CO}_2$  1,0 %

| Удельная скорость<br>воздуха,<br>$\text{дм}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ | Высота слоя<br>ХП-И, мм | Сорбционная емкость $C$ , $\text{дм}^3/\text{кг}$ , по фракциям |                 |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
|                                                                               |                         | 4 мм                                                            | 3 мм            | 2 мм             |
| 0,13                                                                          | 50                      | $33,2 \pm 7,6$                                                  | 112,3           | —                |
|                                                                               | 150                     | $99,5 \pm 13,2$                                                 | 104,8           | —                |
| 0,19                                                                          | 50                      | $27,4 \pm 10,5$                                                 | $106,8 \pm 5,5$ | $107,3 \pm 5,2$  |
| 0,32                                                                          | 50                      | Не работает                                                     | $59,7 \pm 12,7$ | $101,5 \pm 4,1$  |
|                                                                               | 150                     | $103,7 \pm 23,9$                                                | $126,7 \pm 3,6$ | $135,5 \pm 10,8$ |
| 0,64                                                                          | 50                      | Не работает                                                     | $24,6 \pm 5,6$  | $55,5 \pm 25,8$  |
|                                                                               | 150                     | $59,8 \pm 6,2$                                                  | $127,5 \pm 4,3$ | $129,8 \pm 16,8$ |

Таблица 2

Сорбционная емкость поглотителя ХП-И при работе его  
в регенеративном патроне до проскока  $\text{CO}_2$  2,0 %\*

| Удельная скорость<br>воздуха,<br>$\text{дм}^3/(\text{см}^2 \cdot \text{мин})$ | Высота слоя<br>ХП-И, мм | Сорбционная емкость $C$ , $\text{дм}^3/\text{кг}$ , по фракциям |                 |                  |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------|------------------|
|                                                                               |                         | 4 мм                                                            | 3 мм            | 2 мм             |
| 0,13                                                                          | 50                      | $90,6 \pm 12,7$                                                 | 128,3           | —                |
|                                                                               | 150                     | $126,8 \pm 13,2$                                                | 125,6           | —                |
| 0,19                                                                          | 50                      | $75,1 \pm 22,5$                                                 | $130,8 \pm 3,2$ | $130,6 \pm 2,0$  |
| 0,32                                                                          | 50                      | Не работает                                                     | $98,2 \pm 16,9$ | $123,5 \pm 17,8$ |
|                                                                               | 150                     | $133,3 \pm 19,8$                                                | $139,7 \pm 4,5$ | $152,1 \pm 9,1$  |
| 0,64                                                                          | 50                      | Не работает                                                     | $43,6 \pm 4,3$  | $98,3 \pm 3,7$   |
|                                                                               | 150                     | $105,3 \pm 22,3$                                                | $142,5 \pm 5,8$ | $146,3 \pm 9,8$  |

\* Объемы сорбционной емкости указаны при давлении 100 кПа и температуре 0°C.

Из анализа результатов экспериментальных исследований следует, что для аппаратов с малым временем защитного действия (1 ч) стандартный по грануляции поглотитель ХП-И не может быть рекомендован для применения. Также не следует применять для рабочего респиратора со временем защитного действия 4 ч малые слои сорбента, минимально допустимая высота слоя поглотителя составляет 120...150 мм.

**Выводы.** Установлено, что сорбционная емкость известкового химического поглотителя ХП-И зависит от высоты слоя сорбента в регенеративном патроне и его гранулометрического состава, что позволило определить, какие параметры конструкции дыхательных аппаратов необходимо оптимизировать.

## Список литературы / References

1. Тенденции и пути совершенствования известковых хемосорбентов. Основные направления повышения эксплуатационных и хемосорбционных характеристик / Н.Ф. Гладышев, Т.В. Гладышева, С.Б. Путин [и др.] // Российский химический журнал. – 2013. – Т. 57, № 1. – С. 120 – 129.

Gladyshev N.F., Gladysheva T.V., Putin S.B. [et al.] *Tendentsii i puti sovershenstvovaniya izvestkovykh khemosorbentov. Osnovnye napravleniya povysheniya ekspluatatsionnykh i khemosorbtsionnykh kharakteristik* [Tendencies and ways of improvement of lime chemisorbents. Main trends of enhancement of service and chemisorption characteristics]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal – Russian chemical journal*, 2013, vol. 57, no. 1, pp. 120-129. (In Russian).

2. Суворова, Ю.А. Композиционные поглотители диоксида углерода с полимерным связующим (аппаратурно-технологическое оформление производства и кинетика хемосорбции): автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Тамбов, 2015. – 22 с.

Suvorova Yu.A. *Kompozitsionnye poglotiteli dioksida ugleroda s polimernym svyazuyushhim (apparaturno-tekhnologicheskoe oformlenie proizvodstva i kinetika khemosorbtsii): avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Compositional absorbents of carbon dioxide with polymeric binder (process flow arrangement of production and chemisorption kinetics): Cand. tech. sci. diss. abstract]. Tambov, 2015, 22 p. (In Russian).

3. Получение и свойства смешанного щелочного химического поглотителя диоксида углерода / В.В. Самонин, В.В. Далидович, Е.А. Спиридонова [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2015. – Т. 88, № 6. – С. 902 – 906.

Samonin V.V., Dalidovich V.V., Spiridonova E.A. [et al.]. *Poluchenie i svoistva smeshannogo shhelochnogo khimicheskogo poglotitelya dioksida ugleroda* [Preparation and properties of mixed alkaline chemical absorbent of carbon dioxide]. *Zhurnal prikladnoi khimii – Russian journal of applied chemistry*, 2015, vol. 88, no. 6, pp. 902-906. (In Russian).

4. Ехилевский, С.Г. Положение и ширина работающего слоя хемосорбента углекислого газа в изолирующих респираторах и самоспасателях со скачком диаметра гранул кислородсодержащего продукта / С.Г. Ехилевский // Сибирский пожарно-спасательный вестник. – 2019. – № 2(13). – С. 39 – 44.

Ekhilevskii S.G. *Polozhenie i shirina rabotayushhego sloya khemosorbenta uglekislogo gaza v izoliruyushhikh respiratorakh i samospasatelyakh so skachkom diametra granul kislorodsoderzhashhego produkta* [Placement and width of active layer of carbon dioxide chemisorbent in self-contained breathing apparatuses and self-rescuers with snap in diameter of granules of oxygen-containing product]. *Sibirskii pozharно-spasatel'nyi vestnik – Siberian fire and rescue bulletin*, 2019, no. 2(13), pp. 39-44. (In Russian).

*Lyubov Alekseyevna Zborshchik*, senior scientific associate; e-mail: lzborschik@yandex.ru;  
*Ruslan Sergeyevich Pletenetskiy*, senior scientific associate; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;  
*Viktor Ivanovich Frantsev*, advanced engineer; e-mail: oszd\_niigd\_3@mail.ru  
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,  
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-45

## INFLUENCE OF FRACTIONAL COMPOSITION AND LAYER HEIGHT OF THE XII-II ABSORBENT ON ITS SORPTION CAPACITY

**Purpose.** Enhancement of sorption capacity of the XII-II chemical lime absorbent for protective breathing apparatuses.

**Methods.** Experimental methods of investigations of chemical absorbents.

**Results.** The dependences of the sorption capacity of the XII-II chemical lime absorbent from the sorbent layer height in the regenerative cartridge and the fractional composition have been established.

**Scientific novelty.** There have been determined the novel height values of the XII-II chemical lime absorbent layer in the regenerative cartridge and its granulometric composition for sorption optimization.

**Practical value.** The obtained results of the investigations will make it possible to optimize the construction parameters of the breathing apparatuses reducing the mass of the sorbent in use and enhancing their protective ability.

**Keywords:** *chemical lime absorbent; breathing apparatus; protective ability; sorption; sorbent; carbon dioxide; fractional composition.*

**УДК 622.867.4**

*Владимир Михайлович Медгаус, нач. отд.; e-mail: vladimir\_medgaus@mail.ru;*

*Ольга Владимировна Папазова, ст. науч. сотр.; e-mail: papazova-olya.1950@yandex.ru;*

*Николай Николаевич Попов, науч. сотр.; e-mail: popov-nikolay.1963@yandex.ru;*

*Владислав Вячеславович Шлома, инж. 1 кат.; e-mail: ils1995@gmail.com*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,  
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел.: (+38 062) 332-78-51*

## **КОНТРОЛЬ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ АППАРАТОВ ИВЛ ДЛЯ ПРОДЛЕНИЯ СРОКА СЛУЖБЫ**

**Цель.** Возможность продления срока службы аппаратов искусственной вентиляции легких при длительной эксплуатации в подразделениях ГВГСС МЧС ДНР.

**Методы.** Аналитические исследования технического состояния составных частей длительно эксплуатируемых аппаратов для восстановления дыхательной функции, имеющих тенденцию к старению и деформации материалов.

**Результаты.** Полученные данные можно использовать для разработки мер по продлению назначенных сроков службы и порядка исследования технического состояния аппаратов для восстановления дыхательной функции с длительным сроком службы, а также рекомендаций по техническому обслуживанию.

**Научная новизна.** На основании анализа технического состояния вспомогательного оснащения подразделений ГВГСС установлены причины прогнозируемого снижения показателей надежности при длительной эксплуатации.

**Практическая значимость.** Предложен методологический подход к исследованию аппаратов ИВЛ для разработки Методики оценки технического состояния вспомогательного оснащения и повышения эффективности его работы.

**Ключевые слова:** *вспомогательное оснащение; догоспитальный этап; травматический шок; восстановление дыхательной функции; аппараты искусственной вентиляции легких; длительный срок эксплуатации; физико-механические свойства; надежность.*

**Постановка проблемы.** В соответствии с нормативными документами [1] основные функции подразделений МЧС ДНР при ведении аварийно-спасательных работ следующие:

- поиск и спасение людей на аварийных объектах, оказание первой медицинской помощи на месте происшествия и во время эвакуации в учреждения здравоохранения;
- ликвидация медико-санитарных последствий чрезвычайных ситуаций, предоставление экстренной медицинской помощи в зоне чрезвычайной ситуации (зоне поражения) пострадавшим.

Для эффективного выполнения этих функций создана медицинская служба, медицинские работники которой входят в состав аварийно-спасательных подразделений [2]. При реагировании на чрезвычайную ситуацию подразделения медицинской службы оказывают первую медицинскую помощь пострадавшему гражданскому населению, а также сотрудникам аварийно-спасательных служб при состояниях, угрожающих жизни и здоровью.

При различных видах травматических поражений и отравлений у пострадавших развивается шоковое состояние. К важным моментам противошокового комплекса догоспитального этапа относят: восстановление дыхательной функции, сердечной деятельности, остановку наружного кровотечения.

Медицинские работники пожарно-спасательных подразделений имеют в своем распоряжении медицинские сумки (наборы, аптечки), а горноспасательной службы – вспомогательное оснащение [3].

При оказании первой медицинской помощи на месте аварии члены аварийно-спасательных подразделений используют вспомогательное оснащение для восстановления дыхательной функции пострадавшего.

Оптимальное время оказания первой медицинской помощи – до 30 мин после получения травмы, при отравлении – до 10 мин. При остановке дыхания время сокращается до 5...7 мин. Важность фактора времени обусловлена тем, что среди лиц, получивших первую медицинскую помощь в течение 30 мин после травмы, осложнения возникают в два раза реже, чем у лиц, которым помощь была оказана позже [4].

Доминирующие факторы на догоспитальном этапе – уровень технической оснащенности средствами оказания помощи и квалификация персонала. Однако в настоящее время у подразделений горноспасательной службы имеются средства медицинского назначения с превышением полного срока службы.

**Цель исследования** – возможность продления срока службы аппаратов искусственной вентиляции легких при длительной эксплуатации в подразделениях ГВГСС МЧС ДНР.

**Материалы исследования.** В зависимости от вида травмы и состояния пострадавшего первую медицинскую помощь оказывают в такой последовательности: прекращают воздействие внешних поражающих факторов, восстанавливают проходимость дыхательных путей, проводят сердечно-легочную реанимацию, останавливают кровотечение из крупных сосудов.

Так как один из основных видов помощи – дыхательная реанимация, проведены исследования технического состояния аппаратов для искусственной вентиляции легких «Горноспасатель» (далее – аппарат ИВЛ), применяемых в подразделениях горноспасательной службы (табл. 1).

Таблица 1

Наличие аппаратов ИВЛ в подразделениях ГВГСС

| Наименование подразделения | Количество аппаратов ГС-10 | Количество аппаратов ГС-11с | Количество аппаратов ГС-11р |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| ОВГССО г. Донецк МЧС ДНР   | 17                         | 4                           | 7                           |
| ГВГССО г. Горловка МЧС ДНР | 36                         | 0                           | 0                           |
| ГВГССО г. Торез МЧС ДНР    | 11                         | 10                          | 6                           |
| ГВГССО г. Макеевка МЧС ДНР | 20                         | 12                          | 11                          |
| Итого:                     | 84                         | 26                          | 24                          |

Аппараты данной серии портативные, полностью автономные и могут быть использованы в непригодной для дыхания атмосфере. Аппараты ГС-10 и ГС-11с имеют фиксированные значения основных параметров.

У аппарата «Горноспасатель-11р» наиболее широкий спектр функциональных возможностей, что позволяет осуществлять регулируемую искусственную вентиляцию легких, вспомогательную искусственную вентиляцию легких (ВИВЛ), ингаляцию и аспирацию (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид аппарата «Горноспасатель-11р»:

1 – блок аспирации; 2 – блок ВИВЛ; 3 – клапан повышения давления в конце выдоха (ПДКВ); 4 – блок ИВЛ; 5 – блок ингаляции

Технические характеристики аппаратов «Горноспасатель-11с», «Горноспасатель-11р» приведены в табл. 2.

Таблица 2

Технические характеристики аппаратов «Горноспасатель-11с», «Горноспасатель-11р»

| Техническая характеристика                                                | Значение |
|---------------------------------------------------------------------------|----------|
| Запас кислорода в баллоне при давлении 19,6 МПа, дм <sup>3</sup>          | 200,0    |
| Минутная вентиляция ГС-11с – фиксированное значение, дм <sup>3</sup> /мин | 12,0     |
| Минутная вентиляция ГС-11р – нижнее значение, дм <sup>3</sup> /мин        | 8,0      |
| Минутная вентиляция ГС-11р – верхнее значение, дм <sup>3</sup> /мин       | 20,0     |
| Частота дыхания ГС-11с – фиксированное значение, мин <sup>-1</sup>        | 14,0     |
| Частота дыхания ГС-11р – нижнее значение, мин <sup>-1</sup>               | 12,0     |
| Частота дыхания ГС-11р – верхнее значение, мин <sup>-1</sup>              | 20,0     |
| Минутная вентиляция при ВИВЛ, дм <sup>3</sup> /мин                        | 12,0     |
| Максимальное вакуумметрическое давление при аспирации, кПа, не менее      | 40,0     |

В представленных моделях аппаратов ИВЛ пульсирующий поток газовоздушной смеси, близкий к синусоидальному, воспроизводится при помощи переключающего устройства. Основные детали переключающего устройства, ответственные за формирование параметров аппарата ИВЛ: пружины, мембраны и клапаны.

Исследование технического состояния аппаратов ИВЛ со сроком эксплуатации более 10 лет выявило следы старения, механические повреждения, коррозию и деформацию полимерных и резиновых материалов, что снижает надежность аппаратов в целом.

Так как при длительной эксплуатации не всегда возможны модернизация, обновление и ремонт, возрастает актуальность задачи продления назначенного срока службы аппаратов ИВЛ.

Рассмотрены основные методологические принципы для обоснования продления сроков службы аппаратов ИВЛ, то есть комплекс работ, проводимых по определению возможности эксплуатации изделий после окончания назначенных сроков службы [6].

При достижении установленного срока службы необходимо прекратить эксплуатацию аппаратов ИВЛ и принять одно из решений: продолжать эксплуатацию; направить в ремонт; передать для использования по иному назначению до их списания. Продлевая заданные показатели надежности, учитывают условия эксплуатации, требования безопасности для жизни и здоровья людей, охраны окружающей среды.

В действующих в РФ документах по продлению срока службы изделий отсутствует единая терминология в области оценки ресурса [6].

Госгортехнадзор России в 2001 г. рекомендовал внедрять системы контроля, позволяющие проводить экспертизу промышленной безопасности и техническую диагностику без нарушения пригодности к дальнейшим применению и эксплуатации проверяемых технических устройств, оборудования и сооружений (неразрушающий контроль) для принятия решения о продлении назначенного срока их службы.

Неразрушающий контроль – это метод, позволяющий осуществлять диагностирование технических устройств, изделий и оборудования. Причем результаты технического диагностирования лежат в основе принятия решения о продлении назначенного срока службы.

На первом этапе принимают решение о возможности продления срока службы, собирают общие сведения об аппаратах ИВЛ: назначение, состав, основные тактико-технические характеристики, устройство, принцип действия и сведения о составных частях. Также анализируют техническую документацию для определения характера и конкретных условий работы аппаратов ИВЛ, технических параметров, норм и критериев оценки качества элементов, наиболее вероятных отказов и повреждений. Анализу подлежит нормативно-техническая, конструкторская и эксплуатационная документация.

На втором этапе проводят исследование технического состояния составных частей аппаратов ИВЛ. Для проведения работ по контролю параметров

технического состояния используют штатные средства неразрушающего контроля, которые хранят, аттестуют, эксплуатируют, поверяют в соответствии со всеми требованиями руководящих документов по метрологическому обеспечению.

На основании собранных на первом этапе сведений строят структурно-функциональную схему достижения предельного состояния аппаратов ИВЛ (рис. 2).

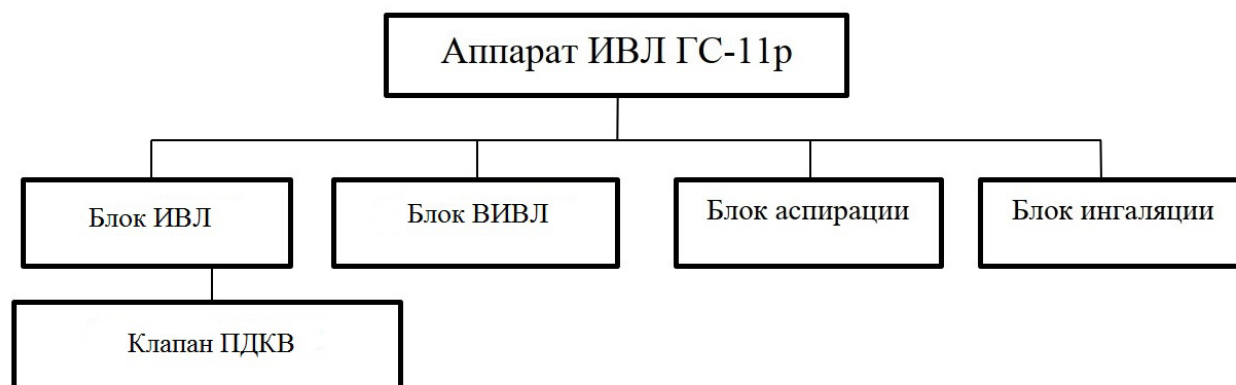


Рис. 2. Структурно-функциональная схема аппаратов ИВЛ

На схеме приведен аппарат ГС-11р, который имеет максимальные функциональные возможности.

Критерии предельного состояния объекта – установленные в стандартах и конструкторских документах признаки, при которых его дальнейшая эксплуатация невозможна, нецелесообразна или опасна. Для определения критериев предельного состояния аппаратов ИВЛ целесообразно рассмотреть признаки, свидетельствующие о невозможности восстановления работоспособного состояния.

Составные части аппаратов ИВЛ: блок искусственной вентиляции легких, блок вспомогательной искусственной вентиляции, блок аспирации, блок ингаляции. Срок службы резиновых мембран и клапанов составных частей зависит от свойств материалов, из которых они изготовлены.

Ранее были выполнены расчеты [5] по нескольким эмпирическим уравнениям старения резины. Оптимальные данные получены по уравнению относительного удлинения  $L$

$$L = L_0 - \sqrt{K\tau}, \quad (1)$$

где  $L_0$  – исходное значение относительного удлинения, %;

$K$  – безразмерный коэффициент скорости старения, зависящий от температуры;

$\tau$  – время старения, сут.

Процесс старения резины происходит при разных температурах, поэтому справедливо уравнение

$$L = L_0 - \sqrt{K' \Delta\tau + K'' \Delta\tau'}, \quad (2)$$

где  $K'$  и  $K''$  – безразмерные коэффициенты скорости старения при разных температурах;

$\Delta\tau$  и  $\Delta\tau'$  – время старения при разных температурах, сут.

Уравнения (1) и (2) эмпирические, поэтому справедливы лишь в ограниченных интервалах времени и температур. Однако указанные время старения и температура удовлетворяют реальным условиям старения [5]. Время старения  $\Delta\tau$  зависит от реального периода эксплуатации аппаратов ИВЛ.

В связи с тем, что физико-механические свойства резиновых деталей влияют на показатели надежности аппаратов ИВЛ, необходимо в процессе исследования проверять значение вероятности безотказной работы и средний срок службы до списания.

Контроль вероятности безотказной работы проводят одноступенчатым методом с ограниченной продолжительностью. План испытаний следует рассчитывать при заданных значениях продолжительности испытаний  $\tau_{и}$ , приемочного  $P_{\alpha}$  и браковочного  $P_{\beta}$  уровней безотказной работы. Контроль показателей безотказной работы при продлении сроков службы изделий необходим, так как срок службы изделий превышает указанный в технической документации.

Учитывая, что снижение уровня надежности аппаратов ИВЛ, срок эксплуатации которых превышает назначенный, ранее не исследовалось, целесообразна разработка соответствующего методологического документа (далее – Методика).

В данном документе по исследованию технического состояния аппаратов ИВЛ с длительным сроком эксплуатации должен быть представлен единый подход к осмотру, текущему ремонту, обслуживанию и проверке параметров. Методику должны применять для продления срока службы аппаратов ИВЛ с периодом эксплуатации более 10 лет.

Продление срока службы осуществляют для конкретного изделия или отдельных его партий, объединенных по периоду их изготовления (вводу в эксплуатацию), с учетом условий эксплуатации. Это важно для экономии материальных и финансовых средств.

Методика должна включать следующие разделы: назначение и область применения; перечень документов для исследования технического состояния; требования безопасности и охраны окружающей среды; требования к проверке технического состояния; наличие дефектов изделия и его сборочных единиц и деталей; замена составных частей; ремонт составных частей; проверка технических параметров после текущего ремонта.

Проверка технического состояния аппарата ИВЛ и его составных частей включает: внешний осмотр, проверку комплектности; осмотр, проверку узлов и деталей; проверку основных эксплуатационных параметров и работоспособности. Данную проверку должен проводить специалист, ответственный за состояние оборудования, в помещении, оснащенном необходимыми инструментами и контрольно-измерительными приборами.

В результате проверки технического состояния определяют необходимость замены или ремонта узлов и деталей аппарата ИВЛ. Все резиновые уплотнительные кольца (прокладки) должны быть заменены новыми, а снятые уничтожены. Сроки эксплуатации остальных деталей и узлов могут превышать нормы и зависят от их фактического состояния. Решение об их дальнейшей эксплуатации принимают по результатам диагностики. Ремонт узлов и деталей аппарата ИВЛ осуществляют в соответствии с требованиями Методики и с учетом производственных возможностей ремонтного предприятия. После ремонта составных частей, замены деталей и сборки узлов аппарата ИВЛ проводят проверку параметров в полном объеме.

На каждый отремонтированный аппарат ИВЛ должен быть составлен формуляр, а на каждую принятую партию – акт приемки выполненных работ и акт о соответствии технических параметров нормативной документации. На основании акта приемки выполненных работ в формуляры всех аппаратов ИВЛ принятой партии вносят запись, подтверждающую продление срока службы.

Прогнозирование изменения свойств резиновых деталей в аппаратах ИВЛ при хранении и эксплуатации может быть предметом для дальнейших исследований безотказной работы аппаратов ИВЛ со сроком службы, превышающим установленный.

**Выводы.** Предложен методологический подход к проведению исследования технического состояния аппаратов ИВЛ с длительным сроком эксплуатации, учитывающий проверку показателя надежности.

#### Список литературы / References

1. Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей: Закон Донецкой Народной Республики от 18.03.2016 № 115-ІНС.

*Ob avariino-spasatel'nykh sluzhbach i statuse spasatelei: Zakon Donetskoi Narodnoi Respubliki ot 18.03.2016 № 115-ІНС* [On emergency-rescue services and status of rescuers: the Law of the Donetsk People's Republic of March 18, 2016 № 115-ІНС]. (In Russian).

2. Положение о медицинской службе Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики: приказ МЧС ДНР от 03.05.2017 № 139.

*Polozhenie o meditsinskoi sluzhbe Ministerstva po delam grazhdanskoi oborony, chrezvychainym situatsiyam i likvidatsii posledstvi stikhiinykh bedstvi Donetskoi Narodnoi Respubliki: prikaz MChS DNR ot 03.05.2017 № 139* [The Provision on the medical service of the Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Donetsk People's Republic: the Decree of the MChS DPR of May 3, 2017 № 139]. (In Russian).

3. Устав по организации и ведению горноспасательных работ Государственной военизированной горноспасательной службы Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики: приказ МЧС ДНР от 28.12.2015 № 965.

*Ustav po organizatsii i vedeniyu gornospasatel'nykh rabot Gosudarstvennoi voenizirovannoi gornospasatel'noi sluzhby Ministerstva po delam grazhdanskoi oborony, chrezvychainym situatsiyam i likvidatsii posledstvi stikhiinykh bedstvi Donetskoi Narodnoi Respubliki: prikaz MChS DNR ot 28.12.2015 № 965* [The Regulation on organization and conduction of mine-rescue operations of the State Para-Military Mine-Rescue Service of the Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Donetsk People's Republic: the Decree of the MChS DPR of December 28, 2015 № 965]. (In Russian).

4. Методические рекомендации к занятиям по дисциплине «Медицинская подготовка» / разраб. В.В. Черкесов. – Донецк: ГОУВПО «Академия гражданской защиты» МЧС ДНР, 2019. – 210 с.

Cherkesov V.V. *Metodicheskie rekomendatsii k zanyatiyam po distsipline "Meditsinskaya podgotovka"* [Methodological recommendations on "Medical training" studies]. Donetsk, GOUVPO "Akademiya grazhdanskoi zashhity" MChS DNR Press, 2019, 210 p. (In Russian).

5. Вакулов, Н.В. Прогнозирование изменения свойств материалов резинокордных оболочек в условиях хранения и эксплуатации / Н.В. Вакулов. – Омск, 2018. – 117 с.

Vakulov N.V. *Prognozirovanie izmeneniya svoistv materialov rezinokordnykh obolochek v usloviyakh khraneniya i ekspluatatsii* [Prediction of changes in characteristics of materials of rubber-cord casings in conditions of storage and operating]. Omsk, 2018, 117 p. (In Russian).

6. Печеркин, А.С. Обоснование и содержание порядка продления остаточного ресурса / А.С. Печеркин // Безопасность труда в промышленности. – 2018. – № 8. – С. 24 – 33.

Pecherkin A.S. *Obosnovanie i sodержanie poryadka prodleniya ostatochnogo resursa* [Substantiation and contents of procedure of residual operating life extension]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Labor safety in industry*, 2018, no. 8, pp. 24-33. (In Russian).

*Vladimir Mikhaylovich Medgaus, head of department; e-mail: vladimir\_medgaus@mail.ru;  
Olga Vladimirovna Papazova, senior scientific associate; e-mail: papazova-olya.1950@yandex.ru;  
Nikolay Nikolayevich Popov, scientific associate; e-mail: popov-nikolay.1963@yandex.ru;  
Vladislav Vyacheslavovich Shloma, engineer of the 1<sup>st</sup> category; ils1995@gmail.com  
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,  
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR  
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-51*

## **CONTROL OF TECHNICAL CONDITION OF ARTIFICIAL LUNG VENTILATION APPARATUSES FOR EXTENSION OF THEIR USEFUL LIFE**

**Purpose.** Possibility of extending the useful life of the long-lived artificial lung ventilation apparatuses deployed by the subdivisions of the State Para-military Mine-Rescue Service of the Ministry for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters of the Donetsk People’s Republic.

**Methods.** Analytical investigations of the technical condition of the components of the long-lived apparatuses for respiratory function restoration which are prone to aging and deformation of materials.

**Results.** The obtained data may be used for developing the measures for extension of the assigned useful life and the procedure for investigation of the technical condition of the long-life apparatuses for respiratory function restoration as well as the recommendations for technical maintenance.

**Scientific novelty.** Based on the analysis of the technical condition of the auxiliary equipment items of the State Para-military Mine-Rescue Service subdivisions the reasons for predicted decrease in the dependability indices during the long-lived operation have been investigated.

**Practical value.** The methodological approach to the investigation of the artificial lung ventilation apparatuses has been proposed for development of the Methodology for assessment of technical condition of auxiliary equipment and enhancement of its operation effectiveness.

**Keywords:** *auxiliary equipment; pre-hospital phase; traumatic shock; respiratory function restoration; artificial lung ventilation apparatuses; long-lived operation life; physical and mechanical properties; dependability.*

## Требования к оформлению и опубликованию статьи

К рассмотрению принимаются статьи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи статьи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с 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 адрес электронной почты;

- название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;
- реферат (от 200 до 300 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;
- раздел журнала для размещения статьи.

### *Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:*

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи (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, Visio). *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. Подрисовочные 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. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

*Список литературы* (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 7.1–2003 и ГОСТ Р 7.0.5–2008. 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.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

#### *Рецензия*

• Поступившая в редакцию рукопись научной статьи рассматривается главным редактором (заместителем главного редактора) на предмет соответствия профилю журнала и требованиям к оформлению. Если рукопись научной статьи соответствует тематике журнала и содержит новые актуальные результаты, то ее направляют рецензентам (соответствующего профиля) для экспертной оценки.

- Рецензент оценивает статью и дает заключение о целесообразности ее публикации.
- Рецензии хранятся в редакции журнала в течение 5 лет.

Если статья не соответствует профилю журнала, то автору сообщается о невозможности её публикации.

В случае положительного решения редакция регистрирует статью и совместно с автором ведёт подготовку статьи к публикации. Перед публикацией статьи автору представляется отредактированный сверстный вариант для просмотра.

Рукописи статей, принятые к публикации, автору не возвращаются.

Ответственность за содержание статьи несет автор.

**Статьи, которые не соответствуют данным требованиям, не рассматриваются.**

# Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал  
2022, № 1(59)

На русском и английском языках

Ответственный редактор Л.В. Барзий

Редактор А.С. Набиулина

Переводчик Л.А. Ахундова

Технический редактор Н.Н. Грибенюк

Учредитель и издатель

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

**Поступившие на издание статьи проходят рецензирование**

**Авторы опубликованных материалов несут ответственность  
за использование сведений, не подлежащих открытой публикации**

Подписано к использованию 11.03.2022.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 332-78-01; 332-78-60

Объем 4,10 Мб

E-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru)

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

**Дата размещения на сайте 18 марта 2022 г.**