



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

№ 3(54)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

---

---

Донецк  
2017

---

---

УДК 614.8"363"+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 3(54). – 120 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 по специальности «Безопасность жизнедеятельности человека» (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:**

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

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 4 от 18.05.2017).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

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

Scientific-technical journal

No. 3(54)

Published quarterly

Found in 1970

---

---

Donetsk  
2017

---

---

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2017. – No. 3(54). – 120 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 which the basic scientific results of dissertations for degrees of doctor and candidate of sciences on the specialty "Human social safety" should be published in (order of the Ministry of Education and Science of the Donetsk People's Republic no. 1134 from 01.11.2016).

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

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

#### **Editorial board:**

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

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 4 from 18.05.2017).

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

## TABLE OF CONTENTS

***I. Пожарная и промышленная  
безопасность******I. Fire and industrial safety***

**Кострубицкий А.А., Агеев В.Г.**  
Обоснование параметров  
экспериментального образца пожарного  
ствола комбинированного действия

7

**Kostrubitskiy A.A., Ageyev V.G.**  
Substantiation of parameters of the  
experimental sample of the combined fire-  
hose barrel

**Богомаз А.М., Пейтибай Г.И.,  
Галухин Н.А.**  
Динамические процессы в стволе  
импульсного устройства  
пожаротушения

16

**Bogomaz A.M., Peftibay G.I.,  
Galukhin N.A.**  
Dynamic processes in the barrel of the pulse  
fire-extinguishing device

**Греков С.П., Глушенко К.В.**  
Моделирование процесса горения  
дисперсных веществ растительного  
происхождения

26

**Grekov S.P., Hlushenko K.V.**  
Modeling the process of combustion  
of disperse vegetable substances

**Зинченко Е.О.**  
Температура нагревания  
проводников в контактных  
соединениях электроустановок

36

**Zinchenko Ye.O.**  
Temperature of heating the  
conductors in plug-and-jack  
connections of electric installations

***II. Безопасность в чрезвычайных  
ситуациях******II. Safety in emergencies***

**Пашковский П.С., Зинченко И.Н.,  
Глушенко К.В., Орликова В.П.**  
Математическая модель самонагревания  
твёрдых дисперсных органических  
веществ

48

**Pashkovskiy P.S., Zinchenko I. N.,  
Hlushenko K.V., Orlikova V.P.**  
The mathematical model of spontaneous  
heating the solid disperse organic  
substances

**Плотников Д.А., Башевая Т.С.**  
Огнестойкость железобетонных  
конструкций из вторичного сырья

57

**Plotnikov D.A., Bashevaya T.S.**  
Fire resistance of reinforced concrete  
structures from secondary raw materials

**Козлитин А.А., Храпоненко О.В.,  
ЩербакOVA О.Н.**  
Оптимизация параметров  
хроматографического разделения  
горючих жидкостей

66

**Kozlitin A.A., Khraponenko O.V.,  
Shcherbakova O.N.**  
Optimization of parameters of the  
chromatographic separation of combustible  
liquids

**Медгаус В.М., Папазова О.В.,  
Попов Н.Н., Клычков А.А.**

Специальная защитная одежда  
пожарных

74

**Medgaus V.M., Papazova O.V.,  
Popov N.N., Klychkov A.A.**

The special protective clothing  
of the firemen

### ***III. Охрана труда***

**Мамаев В.В., Завьялов Г.В.**  
Параметры противотеплового костюма  
с водяным охлаждением

83

**Mamayev V.V., Zavyalov G.V.**  
Parameters of a heat protective suit with  
water cooling

**Гребёнкин С.С., Кравченко Е.В.,  
Буряк Д.С.**  
Экономический ущерб от загрязнения  
окружающей среды предприятиями  
угольной промышленности

91

**Grebyonkin S.S., Kravchenko Ye.V.,  
Buryak D.S.**  
The economic damage because of pollution  
of the environment with collieries

**Морозов М.В., Дорошенко Т.Ф.,  
Зубарева А.С.**  
Рециклинг отходов производства как  
фактор снижения негативного  
воздействия на окружающую среду

102

**Morozov M.V., Doroshenko T.F.,  
Zubareva A.S.**  
Recycling the production waste as a factor  
of decrease of the negative influence  
on the environment

**Овчаренко В.Л., Кременев О.Г.**  
Ретроспективный анализ риска  
подземных горнорабочих угольных  
шахт Донбасса

110

**Ovcharenko V.L., Kremenyev O.G.**  
The retrospective risk analysis  
of underground mine workers of coal mines  
of the Donets Basin

**Требования к оформлению статьи**

118

**Requirements of execution of an article**

## I. Пожарная и промышленная безопасность

### УДК 614.843.4

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

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

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

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

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

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-89*

## ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОБРАЗЦА ПОЖАРНОГО СТВОЛА КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ

**Цель.** Обоснование тактико-технических параметров (длина струи, расход воды, площадь орошения) экспериментального образца пожарного ствола комбинированного действия.

**Методы.** Экспериментальные исследования, обработка результатов аналитических исследований.

**Результаты.** Получены аналитические зависимости для определения длины сплошной и распыленной струй воды и площади орошения.

**Научная новизна.** Установлена зависимость длины струи (сплошной и распыленной) от давления воды в стволе и расхода воды.

**Практическая значимость.** Определены оптимальные параметры работы пожарного ствола, что позволит наиболее эффективно применять его при тушении пожаров.

**Ключевые слова:** *пожарный ствол; сплошная струя; распыленная струя; защитный экран; эксперимент; расчёты; длина струи; расход воды; угол раскрытия.*

**Постановка проблемы.** В пожарно-спасательных подразделениях МЧС ДНР для тушения пожаров используют в основном ручные пожарные стволы РС-50, РС-70, РСП-70, РСК-50, РСКЗ-70, СРК-80, СПП-4 и схожие по конструкции и функциональным возможностям. Эти стволы достаточно эффективны в процессе тушения пожара, однако позволяют обеспечивать подачу в очаг пожара только одного типа огнетушащего вещества и формируют только сплошные струи.

Как свидетельствует практика, нередко во время ликвидации пожаров возникает необходимость одновременной подачи нескольких типов огнетушащих веществ или быстрой замены конфигурации струи в зависимости от особенностей развития пожара. С целью снижения риска травмирования личного состава необходимо обеспечить одновременную подачу сплошной (или распыленной) струи воды на тушение пожара и формирование защитной водяной завесы (экрана).

В Российской Федерации и других странах пожарно-спасательные подразделения давно используют комбинированные и универсальные пожарные стволы.

Например, российские стволы нового образца объединяют в себе возможности одновременной подачи сплошной струи воды и образования защитного водяного экрана [1], однако обладают рядом недостатков:

- нет возможности регулирования расхода воды на создание защитного водяного экрана;
- снижение расхода воды на образование сплошной струи при одновременном создании защитного водяного экрана;
- небольшой диаметр защитного водяного экрана.

Зарубежные пожарные стволы имеют намного лучшие тактико-технические показатели, однако остается открытым вопрос распределения воды между струей и защитным водяным экраном, поскольку в технических характеристиках указан лишь общий её расход [2].

Основные недостатки зарубежных пожарных стволов:

- сложность изготовления элементов ствола;
- трудности ремонта и замены отдельных элементов ствола;
- дороговизна изделия [3].

Проанализировав современное состояние разработки и усовершенствования пожарных стволов, можно сделать вывод, что перспективны:

- разработка комбинированных ручных и переносных пожарных стволов, позволяющих быстро заменять огнетушащее вещество или конфигурацию струи в процессе тушения пожара;
- конструирование пожарных стволов для обеспечения одновременной подачи струй воды (сплошных и распыленных) на тушение пожара и формирование защитного водяного экрана.

НИИГД «Респиратор» разработан экспериментальный пожарный ствол комбинированного действия (рис. 1).

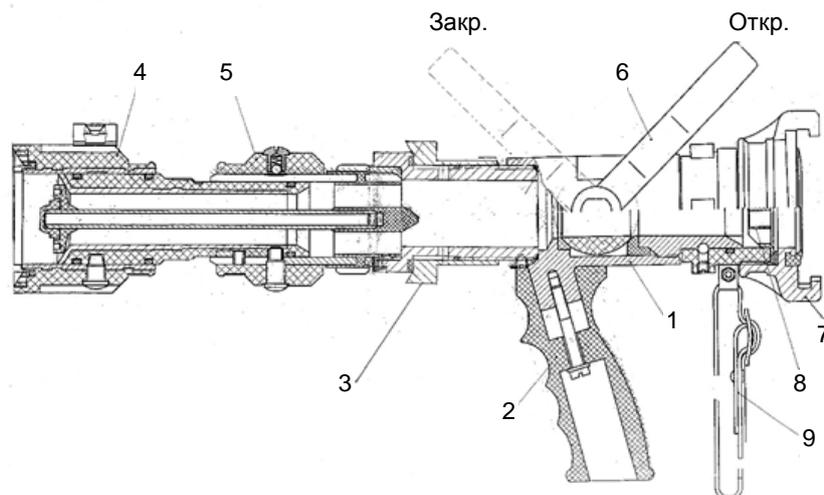


Рис. 1. Пожарный ствол:

- 1 – корпус; 2 – рукоятка; 3 – устройство включения водяной завесы; 4 – головка для изменения формы струи воды; 5 – регулятор расхода воды; 6 – запорное устройство; 7 – головка соединительная, 8 – фильтр; 9 – плечевой ремень

Ствол состоит из корпуса со встроенным в него запорным устройством и навинченными на него соединительной головкой с поворотным механизмом и устройством для включения водяной завесы. К устройству для включения водяной завесы подсоединен регулятор расхода воды с головкой для изменения формы струи воды. В стволе есть фильтр.

Головка для изменения формы струи воды позволяет получать распыленную струю с углом ее раскрытия не менее чем  $30^\circ$ . Регулятор расхода обеспечивает фиксированную подачу воды на очаг пожара: 2, 4, 6, 8 л/с, – в виде компактной и распыленной струй воды. Соединительная головка предназначена для подсоединения пожарного рукава диаметром 51 мм, а поворотный механизм обеспечивает выпрямление рукава в случае его закручивания при подаче воды. Фильтр с размером ячейки  $5 \times 5$  мм обеспечивает очистку воды от крупных включений (камней, водорослей, бумаги и т.д.). Запорное устройство служит для включения или прекращения подачи воды в ствол. Рукоятка предназначена для удобства удержания ствола в процессе его эксплуатации. Плечевой ремень необходим для переноски ствола. Устройство для создания водяной завесы предназначено для включения защитного водяного экрана с расходом воды не менее 1,0 л/с при воздействии на ствольщика теплового излучения. Данное устройство позволяет включать или отключать завесу при одновременном тушении пожара любым типом водяной струи.

Для определения оптимальных параметров работы и необходимых конструктивных размеров ствола была поставлена задача провести его экспериментальные исследования в следующем объеме:

- определить оптимальные тактико-технические параметры работы ствола (дальность подачи воды, её расход, площадь орошения);
- определить эффективность действия защитного водяного экрана;
- провести экспериментальные сравнительные испытания эффективности тушения пожара разработанным стволом и существующими стволами, находящимися на вооружении пожарно-спасательных подразделений МЧС.

В работах [4, 5, 6] описаны экспериментальные исследования разработанных водяного и водопенного ручных стволов, но при отсутствии защитного водяного экрана.

**Цель исследования.** Цель данной статьи – определение тактико-технических характеристик разработанного ствола.

**Материалы и результаты исследований.** На первом этапе экспериментальных исследований определялась зависимость длины  $L$  сплошной и распыленной струй воды от давления воды в стволе  $P$  и её расхода  $q$ . Эксперименты предусматривали учет этих основных факторов, хотя в реальности на длину струи оказывают влияние и другие факторы (например, конвективные потоки от очага пожара, погодные условия, боковой ветер и др.). Эксперименты проводили на учебном полигоне пожарной части с использованием пожарных машин АЦ – 40 (130) 63Б и АЦ 40 (540) в

соответствии с требованиями ГОСТ Р53331-2009. Техника пожарная. Стволы пожарные ручные. Общие технические требования. Методы испытаний.

Давление воды определялось с помощью манометра на пожарной машине. Для определения дальности полета струй вдоль их направления расставляли вешки через каждые 0,5 м. Для определения площади орошения в перпендикулярном к оси сечения водяной струи направлении поступали следующим образом. Выбирали ровную однородную асфальтированную площадку необходимых размеров. На плоскости асфальтированного покрытия делали разметку. Выпускали струю так, чтобы пятно от жидкости распределялось на размеченной поверхности.

Проведено две серии опытов по восемь экспериментов ( $N = 8$ ) в каждой, в процессе которых меняли три параметра – давление воды в стволе  $P$ , МПа; расход воды из ствола  $q$ , кг/с, и угол раскрытия распылённой струи  $\alpha$ , ...°. При этом фиксировали длину струи  $L$ , м.

Для проверки адекватности математической модели дальноточности сплошной струи использовали аналитические зависимости, полученные в работах [7, 8]. По результатам экспериментальных данных эти зависимости могут быть представлены в виде логарифмической кривой:

$$L_m = 8,33 \ln(1 + 23qP^2), \quad (1)$$

где  $L_m$  – максимальная длина сплошной струи, м;

$q$  – расход воды, кг/с;

$P$  – избыточное давление, МПа.

Обработка экспериментальных данных показала, что дальноточность распылённой струи может быть определена по формуле

$$L_p = \frac{L_m}{1 + 0,9 \operatorname{tg}(\pi\alpha / 360) / P}, \quad (2)$$

где  $\alpha$  – угол раскрытия распылённой струи, ...°.

На рис. 2 – 4 представлены рассчитанные по формулам (1) и (2) и экспериментальные данные дальности подачи воды в зависимости от её расхода при разных значениях давления на выходе из сопла. Угол раскрытия сплошной струи принимали равным  $\alpha = 30^\circ$ .

Как видно, расчётные и экспериментальные данные удовлетворительно согласуются друг с другом.

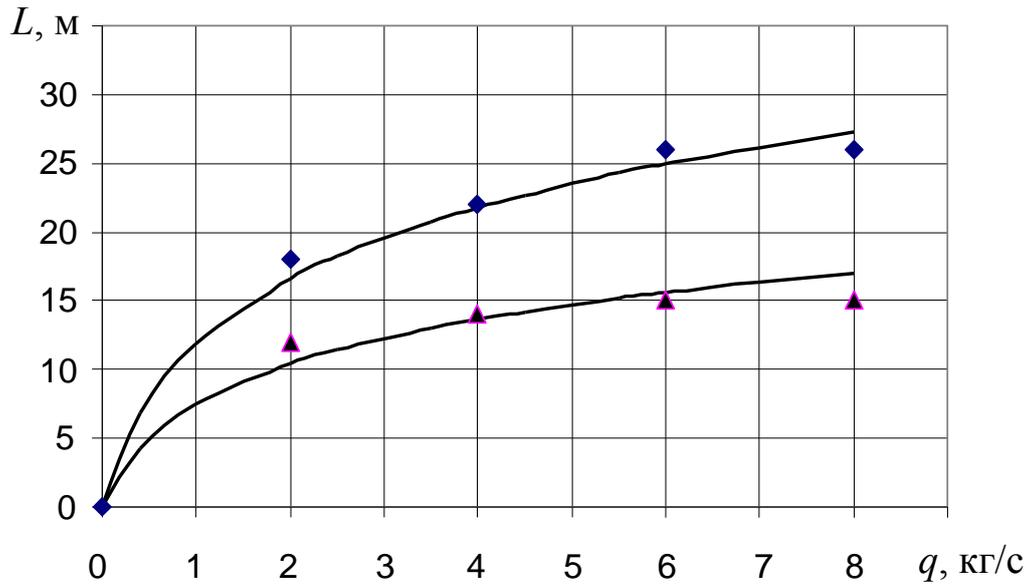


Рис. 2. Сравнение расчетных значений (сплошные линии) с экспериментальными данными дальности подачи сплошной (◆) и распылённой (▲) струй в зависимости от расхода воды при давлении в стволе  $P = 0,4$  МПа

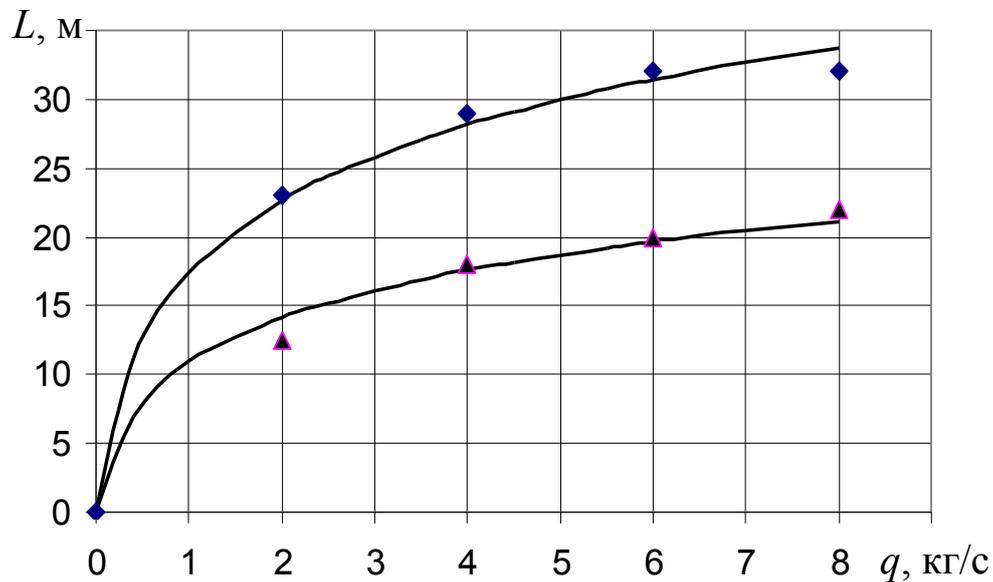


Рис. 3. Сравнение расчетных значений (сплошные линии) с экспериментальными данными дальности подачи сплошной (◆) и распылённой (▲) струй в зависимости от расхода воды при давлении в стволе  $P = 0,5$  МПа

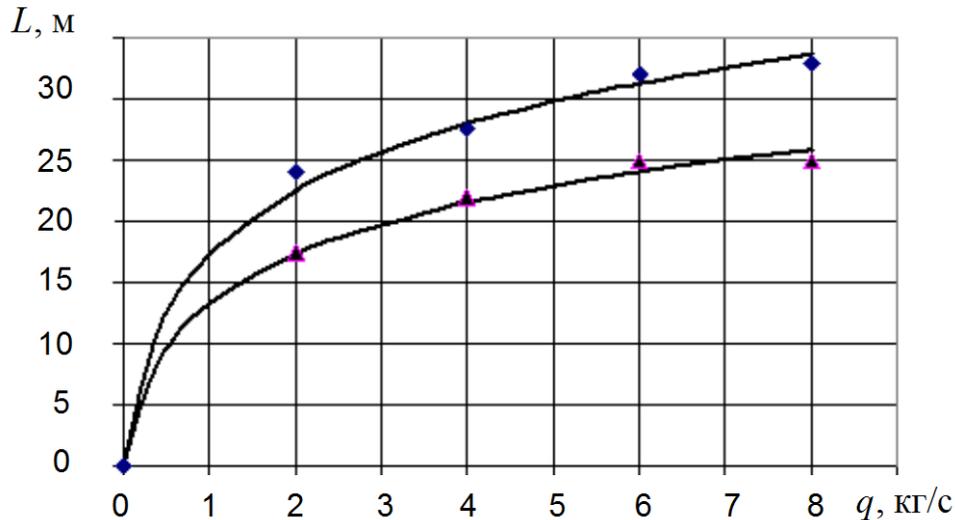


Рис. 4. Сравнение расчетных значений (сплошные линии) с экспериментальными данными дальности подачи сплошной (◆) и распыленной (▲) струй в зависимости от расхода воды при давлении в стволе  $P = 0,6$  МПа

Для определения площади орошения использовали преобразованную формулу [8]

$$S_m = (aw_0V)^{0,8}, \quad (3)$$

где  $S_m$  — максимальная площадь орошения,  $\text{м}^2$ ;

$a$  — эмпирическая константа,  $\text{с}/\text{м}^{1,5}$ ;

$V$  — объем воды в струе,  $\text{м}^3$ .

Так как объем воды равен  $V = S_0L_m$ , а скорость истечения струи, выраженная через расход воды,  $w_0 = q/(\rho S_0)$ , то вместо формулы (3) получим

$$S_m = (aqL_m / \rho)^{0,8}, \quad (4)$$

где  $\rho$  — плотность воды,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$S_0$  — площадь выходного сечения сопла,  $\text{м}^2$ .

Обработка экспериментальных данных показала, что формулу (4) для расчёта площади орошения сплошной струи можно преобразовать к виду

$$S_m = 0,057(qL_m)^{0,8}. \quad (5)$$

Так, установлено, что при расходе воды  $q = 6$   $\text{кг}/\text{с}$  и  $L_m = 32$  м диаметр площади орошения равен 2,2 м, что по формуле (5) соответствует площади орошения, равной  $S_m = 3,8$   $\text{м}^2$ .

Таким образом, выполненные экспериментальные исследования позволили получить расчётные зависимости для определения максимальной длины сплошной и распылённой струй, а также площади орошения сплошной струей.

### Выводы

1. На основе экспериментальных исследований получены полуэмпирические зависимости длины сплошной и распыленной струй от давления воды в стволе, расхода воды и угла распыления струи.

2. Полученные расчетные и экспериментальные результаты удовлетворительно согласуются с погрешностью, не превышающей 10 %. Коэффициент множественной корреляции близок к 1, следовательно, математическая модель адекватно описывает исследуемый процесс.

3. Установлено, что наибольшее влияние на длину сплошной струи, создаваемой в разработанном стволе, оказывают расход воды и давление воды в стволе.

4. Аналогичное влияние на длину распылённой струи оказывает угол её раскрытия, а также расход воды и давление воды на выходе из сопла.

5. Получена аналитическая зависимость максимальной площади орошения от расхода воды и длины сплошной струи, что позволяет определить возможную площадь покрытия очага пожара.

### Список литературы / References

1. Терещнев, В.В. Анализ пожарных стволов «нового поколения» / В.В. Терещнев, С.Т. Казанцев, М.В. Богомалов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – Т. 20, № 3. – С. 52 – 56.

Terebnev, V.V., Kazantsev, S.T., Bogomalov, M.V. *Analiz pozharnykh stvolov "novogo pokoleniya"* [Analysis of fire-hose barrels of the "new generation"]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire-explosion safety*, 2011, vol. 20, no. 3, pp. 52 – 56.

2. Асафьев, В.Н. Пожарные стволы XXI века / В.Н. Асафьев // Пожарное дело. – 2008. – № 7. – С. 28 – 29.

Asaf'yev, V.N. *Pozharnyye stvolyy XXI veka* [Fire-hose barrels of the 20<sup>th</sup> century]. *Pozharnoye delo – Fire work*, 2008, no. 7, pp. 28 – 29.

3. Горбань, М.Ю. РСКУ-50 – универсальный ручной ствол нового поколения / М.Ю. Горбань, В.А. Варганов // Пожарное дело. – 2009. – № 6. – С. 39.

Gorban', M.Yu., Varganov, V.A. *РСКУ-50 – universal'nyy ruchnoy stvol novogo pokoleniya* [РСКУ-50 – the universal hand barrel of the new generation]. *Pozharnoye delo - Fire work*, 2009, no. 6, p. 39.

4. Лазаренко, О.В. Дослідження гідравлічних параметрів ствола для одночасної подачі суцільного та розпиленого струменю / О.В. Лазаренко, В.У. Желяк // Пожежна безпека: зб. наук. пр. / ЛДУБЖД. – Львів, 2010. – № 17. – С. 108 – 112.

Lazarenko, O.V., Zhelyak, V.U. *Doslidzhennia gidravlichnykh parametriv stvola dlia odnochasnoi podachi sutsil'nogo ta pozpylenogo strumeniu* [Investigation of hydraulic parameters for the simultaneous feed of the solid and dispersed jet]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. pr./ LDUBZhD* [Fire safety: proc. of the LDUBZhD]. Lviv, 2010, no. 17, pp. 108 – 112.

5. Васильєва, О.Е. Підвищення ефективності гасіння пожеж ручними (переносними) стволами / О.Е. Васильєва, І.В. Паснак, С.З. Курташ // Пожежна безпека: зб. наук. пр. / ЛДУБЖД. – Львів, 2010. – № 17. – С. 113 – 117.

Vasyl'ieva, O.E., Pasnak, I.V., Kurtash, S.Z. *Pidvyshchennia efektyvnosti gasinnia pozhezh ruchnymy (perenosnymy) stvolamy* [Increase of efficiency of fighting the fires with hand (portable) barrels]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk. pr./ LDUBZhD* [Fire safety: proc. of the LDUBZhD]. Lviv, 2010, no. 17, pp. 113 – 117.

6. Паснак, І.В. Експериментальне дослідження тактико-технічних параметрів комбінованого водопінного ствола / І.В. Паснак, О.Е. Васильєва, У.О. Мовчан // Проблеми пожежної безпеки: сб. науч. тр. / ЛГУБЖД. – Львов, 2012. – № 31. – С. 135 – 144.

Pasnak, I.V., Vasyl'ieva, O.E., Movchan, U.O. *Eksperymental'ne doslidzhennia taktyko-tekhnichnykh parametriv kombinovanogo vodopinnogo stvola* [Experimental investigation of performance characteristics of a combined water-foam barrel]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti: sb. nauch. tr. / LGUBZhD* [Fire safety problems: proc. of the LDUBZhD]. Lvov, 2012, no. 31, pp. 135 – 144.

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

Ol'shanskiy, V.P., Dubovik, O.A. *Voprosy vneshney ballistiki ognetushashchikh veshchestv* [Problems of the external ballistics of fire-extinguishing substances]. Kharkov, Mytets' Publ., 2005, p. 236.

8. Кострубицкий, А.А. Дальнобойность прерывистых струй жидкости при тушении пожаров / А.А. Кострубицкий, В.Г. Агеев // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 2 (53). – С. 7 – 14.

Kostrubitskiy, A.A., Ageyev, V.G. *Dal'noboynost' preryvistykh struy zhidkosti pri tushenii pozharov* [Range capability of interrupted fluid jets by fighting the fires]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 2(53), pp. 7 – 14.

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

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

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

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

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

*283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 311-39-89*

## **SUBSTANTIATION OF PARAMETERS OF THE EXPERIMENTAL SAMPLE OF A COMBINED FIRE-HOSE BARREL**

**Purpose.** Substantiation of the performance characteristics (jet length, water discharge, spraying area) of the experimental sample of the combined fire-hose barrel.

**Methods.** Experimental investigations, analysis of results of the analytical investigations.

**Results.** The analytical dependences to determine the length of the solid and dispersed water jets and the spraying area are obtained.

**Scientific novelty.** The dependence of the jet length (solid and dispersed jets) on water pressure in the barrel and on water discharge is ascertained.

**Practical value.** The optimal parameters of the operation of the fire-hose barrel are determined, what will permit its mostly effective use when fighting the fires.

**Keywords:** *fire-hose barrel; solid jet; dispersed jet; protective barrier; experiment; calculations; jet length; water discharge; opening angle.*

УДК 614.842.612 : 532.525.2

*Андрей Михайлович Богомаз, аспирант; e-mail: [mchs-dnr@mail.ru](mailto:mchs-dnr@mail.ru);*

*Георгий Иванович Пештибай, нач. отд.; e-mail: [niigd.osmas-1@mail.ru](mailto:niigd.osmas-1@mail.ru);*

*Николай Александрович Галухин, инж. I кат.; e-mail: [niigd.osmas-7@mail.ru](mailto: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) 311-12-00*

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В СТВОЛЕ ИМПУЛЬСНОГО УСТРОЙСТВА ПОЖАРОТУШЕНИЯ

**Цель.** Установление закономерностей динамических процессов в стволе импульсного устройства пожаротушения для обоснования его конструктивных параметров и снижения реактивной силы отдачи.

**Методика.** Теоретические исследования с использованием уравнения И.В. Мещерского и общих уравнений движения сплошной среды.

**Результаты.** Получены уравнения, связывающие определяющие конструктивные и режимные параметры в стволе импульсного устройства пожаротушения. Установлены условия оптимальности конструктивного решения струеформирующего устройства.

**Научная новизна.** Разработана математическая модель движения огнетушащей жидкости в стволе импульсного устройства пожаротушения в виде нелинейного дифференциального уравнения второго порядка с учетом переменной массы жидкости.

**Практическая значимость.** Использование предложенных уравнений позволяет обосновать конструктивные параметры ствола, рассчитать реактивную силу, выходную скорость струи, обосновать выбор оптимальных параметров струеформирующего устройства.

**Ключевые слова:** импульсное пожаротушение; динамика; ствол; уравнение движения; реактивная сила; струя.

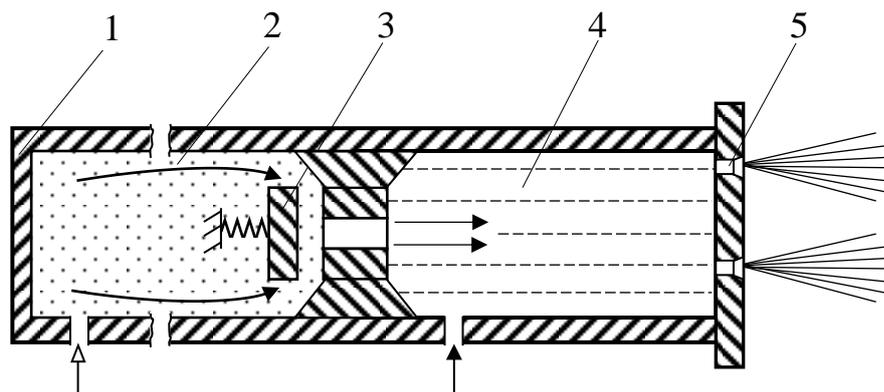
**Постановка проблемы.** Широкое применение импульсных устройств пожаротушения в пожарных подразделениях подтверждает их высокую эффективность при тушении локальных пожаров на начальной стадии. Однако наряду с теоретически известными и практически подтвержденными преимуществами импульсного мелкодисперсного пожаротушения (автономность, мобильность, высокая эффективность использования пожаротушающей жидкости, способность тушения пожара в электроустановках без отключения от электросети) выявлены и некоторые недостатки, основным из которых является импульс силы отдачи, действующей на пожарного. В результате силового воздействия ствола импульсного устройства пожаротушения на человека фиксируются случаи некомфортного состояния пожарного, потеря устойчивости. Перечисленные негативные явления требуют глубокого понимания динамических явлений в стволе импульсного устройства пожаротушения, разработки математической модели внутрикамерных процессов для всестороннего изучения влияния конструктивных параметров на реактивную силу струи, скорость струи, время выстрела.

**Анализ последних исследований.** В работе [1] рассмотрены перспективы применения импульсных струй жидкости для тушения газовых факелов. Приведена схема порохового импульсного водомета с коническим соплом, получены уравнения внутренней баллистики ультраструй. Результаты экспериментальных исследований скорости капельного потока огнетушащей жидкости рассмотрены в статье [2]. И.Н. Грицына и С.А. Виноградов [3] предложили математические зависимости для определения длины сплошного участка струи и получили оценку протяженности сплошного участка ультраструи. Авторы указывают на работы [4, 5], в которых приведено описание экспериментальных и теоретических исследований дальности полета тонкораспыленных струй жидкости. В статье [6] предложена математическая модель внутренней баллистики импульсного водомета. Вышеприведенные работы в основном исследуют ультраструи с пороховым поршневым приводом и не могут быть использованы при изучении динамических процессов в стволах переносных импульсных устройств пожаротушения. В работе [7] рассмотрена динамика импульсных струй жидкости при дистанционном тушении пожара. Полученные уравнения относятся к внешнетраекторным характеристикам движения струй, не объясняют внутрикамерные динамические процессы в стволе импульсного устройства пожаротушения, не позволяют обосновать конструктивные решения ствола и механизма выстрела пожаротушающего устройства. Расчет параметров установки импульсного водяного пожаротушения рассмотрен в статье [8] применительно к импульсному водомету с буферной емкостью и однокамерному стволу. Современные импульсные устройства пожаротушения не имеют буферной емкости, а ствол является двухкамерным и снабжен механизмом выстрела, поэтому результаты работы не могут быть непосредственно применены для описания динамических процессов в стволе импульсного устройства пожаротушения. В работе не исследована реактивная сила струи и не рассмотрены требования к струеформирующему устройству.

**Цель исследования.** Установление закономерностей динамических процессов в стволе импульсного устройства пожаротушения для обоснования его конструктивных параметров с учетом ограничения допустимой реактивной силы и средней скорости струи.

**Изложение основного материала исследований.** Ствол импульсного устройства пожаротушения (см. рисунок) представляет собой жесткий цилиндрический корпус, внутри которого расположены сообщающиеся через управляемый клапан газовая и жидкостная камеры.

При нажатии на курок механизма выстрела управляемый клапан открывается, соединяя находящуюся под избыточным давлением газовую камеру с жидкостной. В результате быстропротекающего процесса расширения газа огнетушащая жидкость выбрасывается через распылители ствола в направлении источника пожара.



Ствол импульсного устройства пожаротушения:

1 – цилиндрический корпус; 2 – газовая камера; 3 – управляемый клапан;  
4 – жидкостная камера; 5 – распылители

Движение огнетушащей жидкости в стволе сопровождается потерей массы (за счет вытеснения через распылители), что влияет на внутрикамерные динамические процессы. Движение огнетушащей жидкости с переменной массой получим на основе уравнения И.В. Мещерского:

$$m \frac{dv}{dt} = PA - R, \quad (1)$$

где  $m$  – переменная масса огнетушащей жидкости, кг;

$v$  – скорость движения жидкости в стволе, м/с;

$P$  – давление в жидкостной камере, Па;

$A$  – площадь сечения ствола, м<sup>2</sup>;

$R$  – реактивная сила, Н.

Силу  $R$  найдем, используя основную формулу газовой динамики для реактивной силы. Применительно к неподвижному стволу импульсного устройства пожаротушения

$$R = \frac{dm}{dt} \omega_o = G \omega_o, \quad (2)$$

где  $\omega_o$  – средняя скорость огнетушащей жидкости на срезе ствола, м/с;

$G$  – массовый расход огнетушащей жидкости, кг/с.

Поскольку скорость жидкости на выходе из ствола равна скорости истечения через распылители, то

$$\omega = \varphi_0 \sqrt{2/\rho} \sqrt{P}, \quad (3)$$

где  $\varphi_0$  – коэффициент скорости оросителя;

$\rho$  – плотность огнетушащей жидкости, кг/м<sup>3</sup>,

а ее среднее значение за время импульса равно

$$\omega_o = \frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} \omega dt,$$

где  $t_u$  – продолжительность импульса (истечения жидкости), с.

Использование формулы (3) для определения  $\omega_o$  неудобно из-за неизвестного выражения для давления  $P$ . Поэтому найдем выражение для скорости из уравнения неразрывности потока огнетушащей жидкости в стволе и в распылителях

$$A \frac{dx}{dt} = \mu n F \sqrt{2/\rho} \sqrt{P}, \quad (4)$$

где  $\mu$  – коэффициент расхода распылителя;

$n$  – количество распылителей;

$F$  – площадь сечения распылителя, м<sup>2</sup>.

Разделив обе части уравнения на  $\varepsilon n F$ , получаем зависимость для скорости на срезе ствола от переменной  $x$ :

$$\omega = \frac{A}{\varepsilon n F} \frac{dx}{dt},$$

где  $\varepsilon$  – коэффициент сжатия струи.

Тогда

$$\omega_o = \frac{1}{t_u} \int_0^{t_u} \frac{A}{\varepsilon n F} \frac{dx}{dt} dt = \frac{A}{\varepsilon n F t_u} \left[ x(t_u) - x(0) \right].$$

Величины  $x(0)$  и  $x(t_u)$  – это начальное и конечное условия дифференциального уравнения (1) (с учетом того, что  $\frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$ ), принимаем

$x(0) = 0$ , а  $x(t_u) = l$ ,

где  $l$  – длина жидкостной камеры, м.

Тогда окончательно находим

$$\omega_o = \frac{lA}{\varepsilon n F t_u} = \frac{l}{\varepsilon \varphi t_u},$$

где  $\varphi = nF/A$  – относительная площадь распылителей.

Зная  $\omega_o$ , определяем выражение для реактивной силы струи импульсного устройства пожаротушения:

$$R = G\omega_o = \mu nF \sqrt{2\rho} \sqrt{P} \frac{l}{\varepsilon\varphi t_u} = \frac{lA}{\varepsilon t_u} \mu \sqrt{2\rho} \sqrt{P}.$$

Учитывая, что масса огнетушащей жидкости в стволе равна

$$m_o = \rho lA,$$

где  $m_o$  – масса огнетушащей жидкости, кг,

получаем

$$R = \frac{m_o}{t_u} \varphi_o \sqrt{2/\rho} \sqrt{P}. \quad (5)$$

Имея в виду, что  $\frac{m_o}{t_u} = G_o$  – среднемассовый расход жидкости на срезе ствола, получаем

$$R = G_o \omega. \quad (6)$$

Таким образом, с учетом специфики процессов в импульсном устройстве пожаротушения получены две равнозначные формулы для реактивной силы струи пожаротушащей жидкости (2) и (6):

$$R = G\omega_o = G_o\omega,$$

в которых используют среднюю скорость или среднемассовый расход.

Переменную массу жидкости в стволе импульсного устройства пожаротушения находим по формуле

$$m = \rho A (l - x). \quad (7)$$

Из уравнения (4) находим давление в жидкостной камере:

$$P = \frac{\rho}{2\mu^2\varphi^2} \left( \frac{dx}{dt} \right)^2. \quad (8)$$

Подставляя (5), (7) и (8) в уравнение (1), получаем

$$x \frac{d^2 x}{dt^2} - l \frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{A}{2\mu^2 \varphi^2} \left( \frac{dx}{dt} \right)^2 - \frac{l}{\varepsilon t_u \varphi} \frac{dx}{dt} = 0. \quad (9)$$

Начальные условия принимаем нулевыми:

$$x(0) = \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = 0.$$

Уравнение (9) дополняем соотношением для нахождения длительности импульса:

$$x(t_u) = l. \quad (10)$$

Нелинейное дифференциальное уравнение (9) не имеет аналитического решения, поэтому возможно только приближенное или численное решение. Решение системы (9) и (10) возможно осуществить итерационным способом. Для этого на первом шаге задают некоторое значение  $t_u$  в формуле (9), производят численное решение дифференциального уравнения и проверяют выполнение уравнения (10). Если условие (10) не выполняется, изменяют  $t_u$  и производят очередную итерацию вычислений до выполнения (10). В результате решения получаем закон движения жидкости  $x(t)$  и время импульса  $t_u$ . По известным  $x(t)$  и  $t_u$  находим наиболее важные характеристики импульсного устройства пожаротушения – начальную скорость на срезе ствола, реактивную силу, давление в жидкостной камере, объемный и массовый расход огнетушащей жидкости, среднюю скорость жидкости и среднемассовый расход за один импульс.

Аналитически выражение для  $x(t)$  невозможно определить, однако оценку величины для скорости жидкости и реактивной силы можно получить в первом приближении на основании следующих соображений. В современных импульсных устройствах пожаротушения давление зарядки газовой камеры – около 2,5 МПа. Следовательно, наибольшее давление в жидкостной камере не превышает 2,5 МПа. Тогда, полагая, что коэффициент скорости струи распылителей ствола равен 0,97, имеем

$$\omega = 0,97 \sqrt{2/1000} \sqrt{2500000} = 68,6 \text{ м/с.}$$

Полученный результат согласуется с технической характеристикой большинства импульсных устройств пожаротушения. Полагая, что ствол оснащен пятью распылителями диаметром 4 мм, находим время истечения жидкости (время импульса) массой 1 кг:

$$t_u = \frac{m_o}{\rho \omega n F} = \frac{1}{1000 \cdot 68,6 \cdot 5 \cdot 12,56 \cdot 10^{-6}} = 0,23 \text{ с.}$$

Реактивную силу находим по формуле

$$R = \frac{m_o}{t_u} \omega = \frac{1}{0,23} \cdot 68,6 = 298 \text{ Н.}$$

В настоящее время отсутствуют нормативные документы, регламентирующие максимально допустимое значение реактивной силы  $R_{\max}$ . Однако некоторые авторы [9] считают ее значение равным 230 Н. В нашем случае  $R > R_{\max}$ . Здесь следует иметь в виду, что вышеполученная оценка для  $R$  является максимальной (при максимальной  $\omega$ ), а ее среднее значение меньше 298 Н. Поэтому принятые параметры струеформирующего оборудования могут быть использованы в конструкции ствола импульсного устройства пожаротушения на этапе экспериментальных исследований. Из формулы (4) вытекает, что распылители не обязательно должны иметь одинаковое проходное сечение, поскольку важна общая суммарная площадь истечения пожаротушающей жидкости. Это обстоятельство позволяет целенаправленно формировать дисперсный состав струй. Например, для эффективного тушения пожара часть капель должна пролететь заданное расстояние до пожара, проникнуть через конвективные тепловые потоки в его очаг и осуществить прямое охлаждение горящего вещества каплями диаметром 5...10 мкм. Другая часть капель должна обеспечить связывание частиц дыма, снижение температурного воздействия пожара на человека и изолирование от кислорода. Поэтому состав капель должен быть полидисперсным, что достигается применением специальных распылителей разного типа. Однако дисперсный состав капель сильно зависит от расстояния между стволом и источником пожара. Дисперсный состав капель, метаемых на максимальную длину, не является оптимальным при приближении пожарного к очагу пожара. Очевидно, что при тушении пожаров импульсным устройством пожаротушения с наиболее оптимальной дальности (3...4 м) необходимо снижение начальной скорости капель и изменение дисперсности. Такая адаптация может быть достигнута за счет поворотного диска, расположенного на срезе ствола. При повороте диска подключается новый набор выходных отверстий распылителей, изменяется дисперсный состав и начальная скорость струй, например, за счет подключения большего количества распылителей.

**Выводы.** Получено дифференциальное уравнение движения огнетушащей жидкости в стволе импульсного устройства пожаротушения с учетом переменной массы, позволяющее рассчитать основные параметры этого устройства: давление в жидкостной камере, скорость струи на срезе ствола, время импульса, реактивную силу, – что может быть использовано при

конструировании экспериментального образца. При некоторых общих допущениях получены оценочные значения начальной скорости, длительности импульса, реактивной силы. Показано, что при количестве распылителей, равном 5, с диаметром сечения, равным 4 мм, реактивная сила 298 Н, длительность импульса 0,23 с, скорость струи на срезе ствола 68,6 м/с.

#### Список литературы / References

1. Перспективы применения импульсных струй жидкости для тушения газовых факелов / А.Н. Семко, М.В. Бескровная, Ю.Д. Украинский и др. // Вісник НТУ ХПІ. – 2013. – № 5 (979). – С. 225 – 232.

Semko, A.N., Beskrovnaya, M.V., Ukrainskiy, Yu.D. etc. *Perspektivy primeneniya impul'snykh struy zhidkosti dlya tusheniya gazovykh fakelov* [Prospects of the use of the pulse liquid jets for fighting the gas flares]. *Visnyk NTU KhPI* [Bulletin of the NTU KhPI]. 2013, no. 5 (979), pp. 225 – 232.

2. Росоха, С.В. Экспериментальное определение скорости капельного потока огнетушащей жидкости, необходимой для тушения газового факела / С.В. Росоха, И.Н. Грицына, С.А. Виноградов // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. / НУГЗ. – Харьков, 2011. – Вып. 30. – С. 205 – 208.

Rosokha, S.V., Gritsyna, I.N., Vinogradov, S.A. *Ekspyrymental'noye opredeleniye skorosti kapel'nogo potoka ognetyushashchey zhidkosti, neobkhdimoy dlya tusheniya gazovogo fakela* [The experimental identification of the velocity of the drop flow of a fire-fighting liquid necessary for extinguishing the gas flare]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti: sb. nauch. tr. / NUGZ* [Problems of the fire safety: proc. of the NUGZ]. Kharkov, 2011, issue 30, pp. 205 – 208.

3. Грицына, И.Н. Расчет длины сплошного участка ультраструй / И.Н. Грицына, С.А. Виноградов // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. / НУГЗ. – Харьков, 2011. – Вып. 29. – С. 46 – 49.

Gritsyna, I.N., Vinogradov, S.A. *Raschyet dliny sploshnogo uchastka ul'trastruy* [Calculation of the length of the continuous sector of ultrajets]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti: sb. nauch. tr. / NUGZ* [Problems of the fire safety: proc. of the NUGZ]. Kharkov, 2011, issue 29, pp. 46 – 49.

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

Abramov, Yu.A., Rosokha, V.Ye., Shapovalova, Ye.A. *Modelirovaniye protsessov v pozharnykh stvolakh* [Modeling the processes in the fire-hose barrels]. Kharkov, Folio Publ., 2001, 195 p.

5. Балістика крапель розпилених рідин / В.П. Ольшанський, С.В. Ольшанський, О.М. Ларін та ін. – Біла Церква: Вид. Пшонківський, 2006. – 124 с.

Ol'shans'kyi, V.P., Ol'shans'kyi, S.V., Larin, O.M. etc. *Balistyka krapel' rozpylenykh ridyn* [Ballistics of drops of mist sprays]. Bila Tserkva: Pshonkivs'kyi Publ., 2006, 124 p.

6. Грицына, И.Н. Математическая модель внутренней баллистики устройства импульсной подачи жидкости для тушения газовых фонтанов в квазистационарной постановке / И.Н. Грицына // Проблемы пожарной безопасности: сб. науч. тр. / НУГЗ. – Харьков, 2009. – Вып. 25. – С. 43 – 46.

Gritsyna, I.N. *Matematicheskaya model' vnutrenney ballistiki ustroystva impul'snoy podachi zhidkosti dlya tusheniya gazovykh fontanov v kvazistatsionarnoy postanovke* [The mathematical model of the internal ballistics of a liquid pulse feed device for fighting the gas blowouts in the quasi-stationary arrangement]. *Problemy pozharnoy bezopastosti: sb. nauch. tr. / NUGZ* [Problems of the fire safety: proc. of the NUGZ]. Kharkov, 2009, issue 25, pp. 43 – 46.

7. Кострубицкий, А.А. Динамика импульсных струй жидкости при дистанционном тушении пожара / А.А. Кострубицкий, В.Г. Агеев // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2016. – № 1(53). – С. 7 – 15.

Kostrubitskiy, A.A., Ageyev, V.G. *Dinamika impul'snykh struy zhidkosti pri distantsionnom tushenii pozhara* [The dynamics of liquid pulse jets by the remote fighting of the fire]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 7 – 15.

8. Егоров, А.Н. Определение параметров установки импульсного пожаротушения / А.Н. Егоров, Г.А. Атанов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1995. – С. 38 – 45.

Yegorov, A.N., Atanov, G.A. *Opredeleniye parametrov ustanovki impul'snogo pozharotusheniya* [Determination of parameters of a pulse fire-extinguishing installation]. *Gornospasatel'noye delo, sb.nauch. tr. / NIIGD* [Proc. of the NIIGD "Mine-rescue work"]. Donetsk, 1995, pp. 26 – 33.

9. Мамаев, В.В. Определение реактивной силы двухфазной истекающей из сосуда под давлением струи / В.В. Мамаев, В.В. Гуржий, Р.Я. Лозинский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2003. – С. 33 – 36.

Mamayev, V.V., Gurzhiy, V.V., Lozinskiy, R.Ya. *Opreledeniye reaktivnoy sily dvukhfaznoy istekayushchey iz sosuda pod davleniyem strui* [Determination of the reactive force of the two-phase jet flowing out of the vessel under pressure]. *Gornospasatel'noye delo, sb.nauch. tr. / NIIGD* [Proc. of the NIIGD "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2003, pp. 33 – 36.

*Andrey Mikhailovich Bogomaz*, postgraduate student; e-mail: [mchs-dnr@mail.ru](mailto:mchs-dnr@mail.ru);

*Georgy Ivanovich Peftibay*, head of department; e-mail: [niigd.osmas-1@mail.ru](mailto:niigd.osmas-1@mail.ru);

*Nikolay Aleksandrovich Galukhin*, engineer of the 1<sup>st</sup> category; e-mail: [niigd.osmas-7@mail.ru](mailto: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) 311-12-00

## **DYNAMIC PROCESSES IN A BARREL OF A PULSE FIRE-EXTINGUISHING DEVICE**

**Purpose.** Establishment of regularities of the dynamic processes in the barrel of the fire-extinguishing device to substantiate its design parameters and to decrease the return reactive force.

**Methods.** Theoretical investigations with the use of the I.V. Meshcherskiy equation and of the general motion equations of the continuum.

**Results.** The equations that unite the determinative constructive and conditions parameters in the barrel of the fire-extinguishing device are obtained. The optimality conditions of the constructive decision of the stream-forming device are ascertained.

**Scientific novelty.** The mathematical model of the motion of the fire-extinguishing liquid in the barrel of the pulse fire-extinguishing device in the form of the non-linear second-order differential equation is worked out taking into account the variable mass of the liquid.

**Practical value.** The use of the equations proposed allows substantiating the constructive parameters of the barrel, calculating the reactive force, the exit velocity of the jet, justifying the choice of the optimum parameters of the stream-forming device.

**Keywords:** *pulse fire-extinguishing; dynamics; barrel; motion equation; reactive force; jet.*

УДК [614.841.41:614.842.614]:001.891.573

*Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: [obep.niigd@list.ru](mailto:obep.niigd@list.ru);*

*Кристина Валериевна Глушенко, инж. I кат.; e-mail: [kristina.hlushenko@mail.ru](mailto:kristina.hlushenko@mail.ru)*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-13-52*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ДИСПЕРСНЫХ ВЕЩЕСТВ РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

**Цель.** Разработка математической модели процесса прекращения горения органических веществ при прерывании подачи воздуха на окисляющееся вещество и моделирование процесса на примере прекращения горения насыпи травяной муки.

**Методика.** Аналитические исследования и моделирование процесса взаимодействия углерода с кислородом при его выгорании.

**Результаты.** Получена аналитическая зависимость изменения температуры внутри очага горения органического вещества при его изоляции от доступа кислорода с учётом теплоотдачи.

**Научная новизна.** Впервые установлена зависимость для вычисления комплексного критерия генерации и отвода теплоты при затухании очага горения растительного сырья после прекращения подачи воздуха и его численное значение при переходе от пламенного горения к тлению.

**Практическая значимость.** Расчёт времени затухания очага горения после прекращения подачи воздуха имеет существенное значение с точки зрения совершенствования существующих и разработки более эффективных способов тушения пожаров.

**Ключевые слова:** самовозгорание; пламенное горение; тление; реакции окисления; прекращение горения.

**Постановка проблемы.** При производстве, хранении и переработке растительного сырья (древесные опилки, травяная мука, зерно различных культур и пр.) в силосах и бункерах в случае нарушения организации и ведения технологического регламента (превышение установленных сроков хранения; повышенные влажность, сорность, масличность; некачественная зачистка силосов и бункеров от продуктов предшествующего периода хранения; совместное хранение разнородных продуктов и др.) возникают очаги самонагревания.

Длительное хранение самонагревающихся продуктов приводит к их самовозгоранию, при котором в свободные объёмы силосов (бункеров) – в надсводное и подсводное пространства, а также в помещения надсилосного и подсилосного этажей поступают горючие газообразные продукты термоокислительной деструкции растительного сырья: водород, метан, оксид углерода в концентрациях, превышающих значение нижних пределов распространения пламени.

На рис. 1 приведены схемы возникновения взрыва при хранении растительного сырья [1].

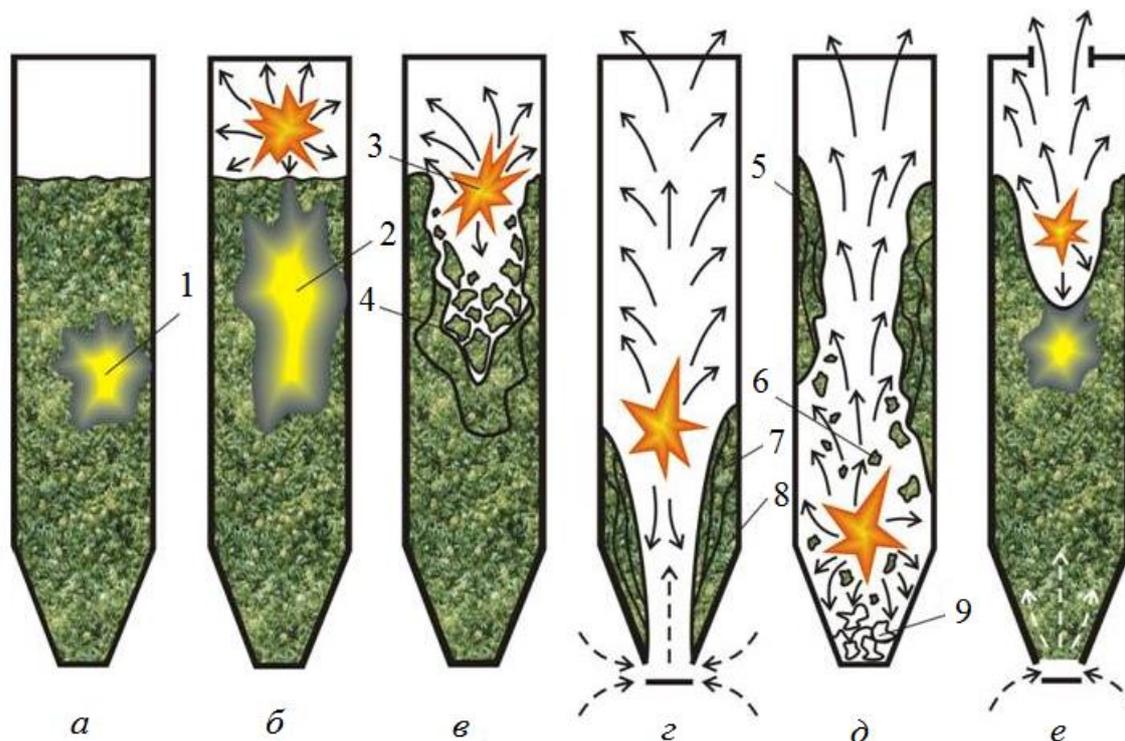


Рис. 1. Схема возникновения взрыва при хранении в силосе сырья и его самовозгорания:

а – силос с развивающимся гнездовым очагом самовозгорания сырья; б – взрыв при выходе очага на поверхность сырья; в – взрыв при обрушении свода; г – взрыв при самовозгорании остатков и вскрытии выпускной воронки; д – взрыв при обрушении остатков самовозгоревшего сырья; е – взрыв при вскрытии загрузочного люка;  
 1 – гнездовой очаг самовозгорания; 2 – свободная полость, образовавшаяся при выгорании сырья; 3 – зона возгорания смеси и взрыва; 4 – обрушившийся свод; 5 – остатки сырья на стенке силоса; 6 – обрушение горящих слоев; 7 – очаг вертикально-пластового самовозгорания; 8 – очаг низового самовозгорания; 9 – остатки сырья в выпускной воронке;  
 ← — пути распространения продуктов взрыва; <---- — подсос воздуха

Ликвидация аварии при возникновении очагов самовозгорания в силосах и бункерах производится комбинированным способом и состоит из трех основных операций [1, 2]:

- максимально возможная герметизация силоса с горящим растительным сырьем для предотвращения доступа кислорода в зону горения через технологические люки и неплотности в соединениях конструктивных элементов;
- флегматизация горючей газовой смеси в свободных объемах аварийного и смежных с ним силосов, соединенных между собой перепускными окнами. Данная флегматизация силоса осуществляется путем его заполнения инертными газами и снижения объемной доли кислорода до оптимального значения, равного 8 % и менее, и снижения объемной доли горючих газов:  $H_2$  – не более 0,2 %;  $CO$  – не более 0,6 %;  $CH_4$  – не более 0,25 %. Вытеснение горючей газовой смеси из свободного объема надсводного

пространства силоса (бункера) достигается также воздушно-механической пеной, подаваемой в силос сверху через загрузочный люк. При флегматизации свободных объемов силосов объемная доля инертных газов в них составляет: газообразного диоксида углерода – не менее 60 %; газообразного азота – не менее 70 %. В качестве средства флегматизации используют также твердый диоксид углерода («сухой лед») из расчета 2 кг на 1 м<sup>3</sup> свободного объема силоса, а также топочные газы объемной долей не менее 70 %;

- активное тушение очага горения водой, воздушно-механической пеной или другими пожаротушащими средствами.

Таким образом, тушение пожаров в силосах (бункерах) осуществляется активным воздействием на них пожаротушащих средств или изоляцией с целью прекращения подачи кислорода к очагу горения, или дополнительным воздействием на него инертных газов. Иногда последний способ является единственно возможным из-за отсутствия доступа к очагу горения. Изучение условий тушения таких пожаров имеет большое значение при совершенствовании существующих и разработке более эффективных способов тушения.

**Анализ последних исследований.** Вопросы тушения эндогенных пожаров дисперсных растительных горючих материалов изучали авторы [1 – 3]. Исследования проводили в лабораторных условиях [3] и производственных на реальных пожарах при горении сырья в бункерах и силосах [1].

Установлено [3], что поскольку все органические растительные вещества имеют большую энергию активации, это позволяет при анализе процессов прекращения горения использовать математический аппарат тепловой теории горения, в частности, разложение Д.А. Франк-Каменецкого, что не приводит к большим погрешностям, так как  $E \gg RT_\infty$  и  $T \gg \Delta T$ :

$$e^{-E/R(T_\infty - \Delta T)} \approx e^{-E/RT_\infty} e^{-E\Delta T/RT_\infty^2}, \quad (1)$$

где  $E$  – энергия активации, Дж/моль;

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

$T_\infty$  – температура при отсутствии теплотерь, К;

$\Delta T$  – охлаждение зоны горения из-за теплотерь, К;

$RT_\infty/E$  – характеристический температурный интервал.

Показано, что для прекращения горения необходимо выполнение хотя бы одного из следующих условий [1]:

- изоляция очага от воздуха или снижение концентрации кислорода до значения, при котором горение невозможно;
- охлаждение очага горения ниже определенных температур;
- интенсивное замедление скорости химических реакций в пламени (ингибирование горения);
- создание условий теплоотвода.

При этом для прекращения горения необходимо обеспечить условие

$$Q_1 \leq Q_2, \quad (2)$$

где  $Q_1$  – тепловыделение в очаге пожара, Вт/м<sup>3</sup>;

$Q_2$  – теплоотвод от очага пожара в окружающую среду, Вт/м<sup>3</sup>.

Горение во внешней диффузионной области прекращается тогда, когда отвод теплоты от горящего материала происходит с большей скоростью, чем поглощение им теплоты, поступающей от пламени. Одновременно расчеты показывают, что прекращение горения охлаждением зоны реакции требует отвода такого количества теплоты, которое соответствует 45 % теплоты сгорания горючего вещества.

Однако возникают затруднения при исследовании температурных полей после прекращения подачи кислорода на окисляющееся вещество, поскольку в настоящее время нет корректной и четкой математической модели, описывающей динамику температуры процесса прекращения горения при изоляции дисперсных органических веществ.

**Цель исследования.** Разработка на основе теории теплового взрыва математической модели процесса прекращения горения растительного сырья при прерывании подачи кислорода на окисляющееся вещество и проверка адекватности предложенной модели литературными данными.

**Материалы и результаты исследований.** Воспользуемся математической моделью самонагрева органических веществ, предложенной в работе [4]. Для случая охлаждения горящих веществ выражение для температуры в насыпи аналогично приведенному в [4] и с заменой знака во втором слагаемом имеет вид

$$\frac{T}{T_0} = 1 - \frac{1 - \left[ \exp(\Gamma_T Fo) \right]^{-\Gamma_v}}{\Gamma_v}, \quad (3)$$

где  $T$  – текущая температура, К;

$T_0$  – температура очага на момент начала охлаждения, К;

$\Gamma_T$  – комплексный критерий генерации теплоты;

$Fo$  – критерий Фурье;

$\Gamma_v$  – комплексный критерий генерации и отвода теплоты.

С целью проверки применимости модели (3) для описания процесса прекращения горения и определения численных значений критериев  $\Gamma_T$  и  $\Gamma_v$  воспользуемся литературными экспериментальными данными [3] о прекращении горения травяной муки (рис. 2).

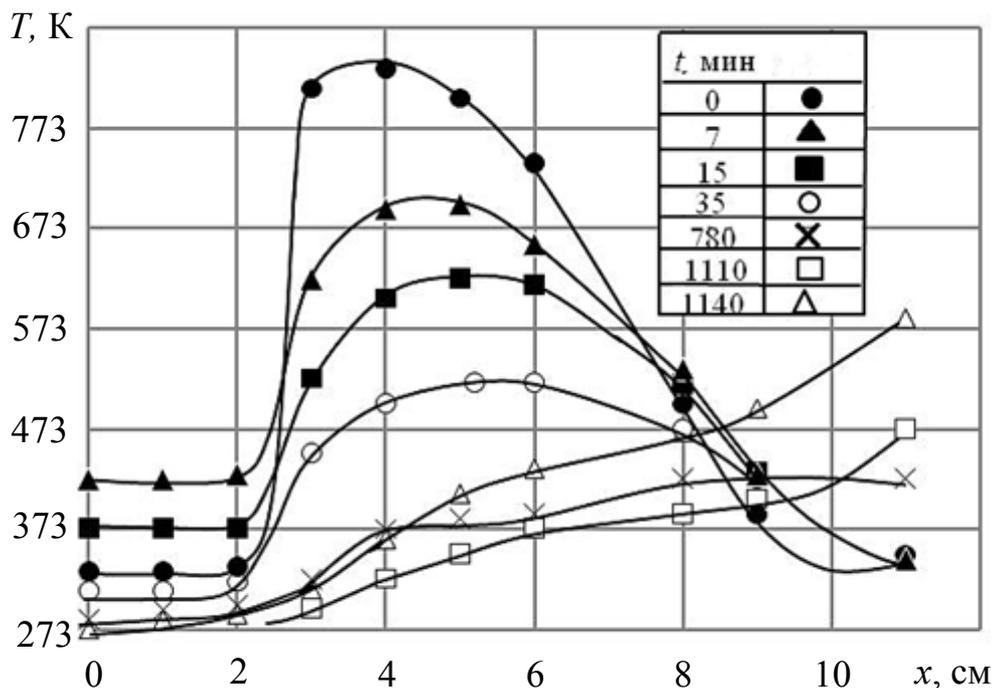


Рис. 2. Кривые процесса прекращения горения травяной муки фракцией 0,006...0,63 мм с плотностью  $\rho = 216 \text{ кг/м}^3$ , влажностью  $W = 8 \%$ , порозностью  $\varepsilon = 78,4 \%$  [3]:  $T$  – температура в насыпи сырья;  $x$  – расстояние от центра очага горения к периферии

Моделирование процесса динамики температуры в насыпи травяной муки после прекращения подачи кислорода производилось путём вычисления параметров  $\Gamma_T$  и  $\Gamma_V$  по формуле (3) для каждой из кривых, представленных на рис. 2, по заданному времени  $t$ , мин, и температуре  $T$ , К.

При вычислении критерия  $Fo = at/R^2$  принимали значение коэффициента температуропроводности травяной муки равным  $a = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$  и радиус насыпи  $R = 0,1 \text{ м}$ .

Величину  $\Gamma_V$  определяли зависимостью [5]

$$\Gamma_V = \frac{\mu^2}{\Gamma_T} - 1, \quad (4)$$

где  $\mu^2 = f(Bi)$  – параметр теплоотвода, сложная функция, зависящая от критерия  $Bi$  [6].

Для небольших значений  $Bi$  ( $Bi < 1$ ) можно принять

$$\Gamma_V = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1. \quad (5)$$

Установлено изменение  $\Gamma_T$  при  $Bi = 0,1$  для всех представленных экспериментальных кривых в зависимости от времени с момента прекращения подачи кислорода к очагу горения (рис. 3).

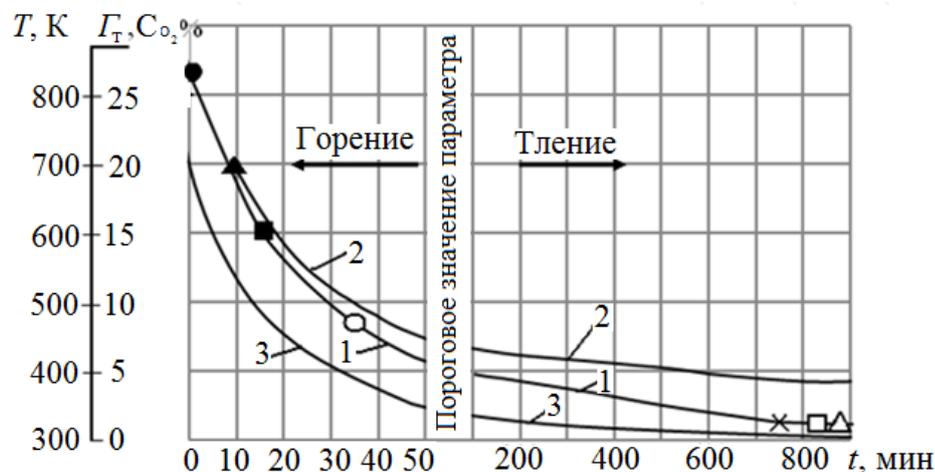


Рис. 3. Изменение величин  $\Gamma_T$  (кривая 1),  $T$  (кривая 2) и  $C_{O_2}$  (кривая 3) с момента прекращения подачи кислорода к очагу горения травяной муки

Изменение параметра  $\Gamma_T$  описывают зависимости

$$\Gamma_T = 30 - 3,85t^{0,49} \quad (0 \leq t \leq 50 \text{ мин}); \quad (6)$$

$$\Gamma_T = 3 - 0,014t^{0,744} \quad (\text{при } t > 50 \text{ мин}). \quad (7)$$

Зависимость (6) отражает процесс прекращения горения травяной муки. Критерий  $\Gamma_v$  при этом равен

$$\Gamma_v = \frac{f(Bi)}{\Gamma_T} - 1 = \frac{3Bi}{6,5} - 1 = 0,46 Bi - 1. \quad (8)$$

В нашем примере  $\Gamma_v = -0,954$ . С увеличением критерия  $Bi$  значение  $\Gamma_v$  возрастает и при  $Bi = 2,1$  будет равно 0. Второе слагаемое в уравнении (3) также равно нулю, при этом будет достигнуто равновесие между притоком  $\Gamma_T$  и отводом теплоты  $3Bi$ , когда горение прекращается. Для общего случая горения веществ пороговое значение соотношения подвода и отвода теплоты (переход от пламенного горения к тлению) будет равно  $\mu^2/\Gamma_T = f(Bi)/\Gamma_T$ .

Как видно из проведенных исследований процесса прекращения горения травяной муки, величина  $\mu^2/\Gamma_T$  для окончания пламенного горения близка к 1 и составляет 0,954. Это соответствует температуре тления, равной примерно 150 °С.

В связи с тем, что основным параметром, влияющим на снижение во времени величины  $\Gamma_T$ , является уменьшение объемной доли кислорода до 3 % за счёт его выгорания, можно предположить, что кратность снижения объемной доли кислорода соответствует такой же кратности уменьшения  $\Gamma_T$ . Тогда, учитывая, что в начальный момент объемная доля кислорода была 21 %, а величина  $\Gamma_T = 30$ , ее значения со временем будут такими, какие представлены на кривой 3 (см. рис. 3). При этом пороговое значение объемной доли кислорода будет равно 2,1 %. С этого момента начинается процесс тления, который может быть очень длительным из-за присутствия кислорода в порах вещества.

На возможность длительного тления растительного материала в условиях низкой объемной доли кислорода указывал ряд авторов [7 – 9]. Возможность тления растительных горючих материалов при низкой объемной доле кислорода обусловлена тем, что в реакции окисления участвует кислород, содержащийся в порах вещества, а также входящий в их состав в количестве до 40 % [10].

Из уравнений (3) и (4) следует, что процесс прекращения горения при известном значении  $Bi$  зависит только от параметра генерации теплоты  $\Gamma_T$ .

Поскольку функция отвода теплоты  $f(Bi)$  для каждого горючего органического вещества может быть найдена согласно методике [5], то, применяя соотношение  $f(Bi)/\Gamma_T = 0,954$ , можно определить для каждого исследуемого вещества значение параметра  $\Gamma_T$ , физический смысл которого представляет собой пороговое значение перехода пламенного горения к тлению. Продолжительность этого периода может быть найдена из формулы

$$t = \frac{-\ln \left[ \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \Gamma_v + 1 \right]}{\Gamma_v \Gamma_T} \frac{R^2}{a}. \quad (9)$$

Параметр  $\Gamma_T$  для каждого органического вещества определяют его свойства и может быть записан в виде

$$\Gamma_T = \frac{\xi C_{O_2} q k R^2}{\rho c_v T a}, \quad (10)$$

где  $C_{O_2}$  – концентрация кислорода, моль/м<sup>3</sup>;

$q$  – теплота реакции окисления, Дж/моль;

$k$  – константа скорости реакции окисления, с<sup>-1</sup>;

$\rho$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>;

$c_v$  – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);

$\xi$  – параметр, учитывающий соотношение внутренней и внешней поверхностей реагирующего вещества.

Согласно [3]:  $\rho = 216 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 111 \text{ кДж/моль}$ ;  $R = 0,1 \text{ м}$ ;  $q = 4,6 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$ ;  $c_v = 1800 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $a = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$ . Для периода перехода от пламенного горения к тлению примем следующие данные:  $T = 424 \text{ К}$ ;  $k_0 = 1,34 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}$ ;  $k|_{T=424} = 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ ;  $\Gamma_T = 6,7$ ;  $C_{O_2} = 2,1 \% = 0,94 \text{ моль/м}^3$ .

Тогда, подставляя все данные в уравнение (9), получим величину  $\xi = 868$ .

Величина  $\xi$  отражает известный факт, что внутренняя поверхность вещества на несколько порядков превышает внешнюю. В связи с этим при переходе от пламенного горения к тлению реагирующая поверхность все больше перемещается в глубь вещества, где имеется кислород, объемная доля которого может достигать 40 % массы веществ. Это объясняет длительное затухание тлеющего горения и необходимость принятия кардинальных решений к его полному прекращению, поскольку возобновление подачи воздуха приводит к быстрому рецидиву пламенного горения вещества, подсушенного в период тления.

**Выводы.** Впервые предложена математическая модель процесса прекращения горения органических дисперсных веществ после прерывания подачи воздуха (изоляция). Установлены зависимости для определения порогового значения комплексных показателей  $\Gamma_T$  и  $\Gamma_V$  прекращения пламенного горения и перехода в тление. По литературным данным проверена адекватность математической модели процесса прекращения горения травяной муки при прерывании подачи воздуха. Показана возможность применения полученных зависимостей для расчёта параметров процесса прекращения горения других органических веществ растительного происхождения на основании справочных данных об их теплофизических свойствах и условиях теплоотдачи.

#### Список литературы / References

1. Корольченко, А.Я. Процессы горения и взрыва / А.Я. Корольченко. – М.: Пожнаука, 2007. – 266 с.

Korol'chenko, A.Ya. *Protsessy goreninya i vzryva* [Combustion and explosion processes]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007, 226 p.

2. Горшков, В.И. Самовозгорание веществ и материалов / В.И. Горшков. – М.: ВНИИПО, 2003. – 446 с.

Gorshkov, V.I. *Samovozgoraniye veshchestv i materialov* [Spontaneous combustion of substances and materials]. Moscow, VNIPO Publ., 2003, 446 p.

3. Физические основы процесса тушения растительных горючих материалов / Л.П. Вогман, А.Г. Дегтярев, Г.С. Киселев, Ю.Д. Щелковин // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – № 1. – С. 55 – 60.

Vogman, L.P., Degtyaryev, A.G., Kiselyev, G.S., Shchelkovin, Yu.D. *Fizicheskiye osnovy protsessy tusheniya rastitel'nykh goryuchikh materialov* [The

physical fundamentals of the process of fighting the vegetable combustible materials]. *Pozharovzryvobesopasnost' – Fire-explosion safety*, 2002, no. 1, pp. 55 – 60.

4. Математическое моделирование формирования полей температур при самонагревании органических веществ / П.С. Пашковский, С.П. Греков, А.А. Всякий, К.В. Глушенко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2016. – № 3(53). – С. 36 – 46.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A., Hlushenko, K.V. *Matematicheskoye modelirovaniye formirovaniya poley temperatur pri samonagrevanii organicheskikh veshchestv* [The mathematical modeling of forming the temperature fields by the spontaneous heating of organic substances]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2016, no. 3(53), pp. 36 – 46.

5. Греков, С.П. Расчёт коэффициентов теплоотдачи в слое зернистого вещества / С.П. Греков, И.Г. Старикова, К.В. Глушенко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2017. – № 2(54). – С. 59 – 68.

Grekov, S.P., Starikova, I.G., Hlushenko, K.V. *Raschet koeffitsiyentov teplootdachi v sloye zernistogo veshchestva* [Calculation of heat-transfer coefficients in the layer of a granular substance]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2017, no. 2(54), pp. 59 – 68.

6. Лыков, А.В. Теория теплопроводности / А.В. Лыков. – М.: Высш. шк., 1997. – 599 с.

Lykov, A.V. *Teoriya teploprovodnosti* [Theory of heat conduction]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1997, 599 p.

7. Головкин, В.В. Противоточное тление растительных материалов / В.В. Головкин // Физика аэродисперсных систем. – 2014. – Вып. 51. – С. 60 – 66.

Golovko, V.V. *Protivotochnoye tleniye rastitel'nykh materialov* [The counterflow decomposition of vegetable materials]. *Fizika aerodispersnykh system – Physics of aerodisperse systems*, 2014, issue 51, pp. 60 – 66.

8. Бахман, Н.Н. Влияние волны направления и скорости потока воздуха на характеристики волн тления в пористых слоях горючего / Н.Н. Бахман, Г.П. Кузнецов, В.М. Пучков // Физика горения и взрыва. – 2002. – Т. 35, № 5. – С. 33 – 40.

Bakhman, N.N., Kuznetsov, G.P., Puchkov, V.M. *Vliyaniye volny napravleniya i skorosti potoka vozdukha na kharakteristiki voln tleniya v poristyykh sloyakh goryuchego* [Influence of wave of direction and air flow velocity on the characteristics of the decomposition waves in the porous layers of a fuel]. *Fizika goreniya i vzryva – Physics of combustion and explosion*, 2002, vol. 35, no. 5, pp. 33 – 40.

9. Головкин, В.В. Волна тления в органическом горючем / В.В. Головкин, Я.И. Вовчук, Е.А. Идисис // Физика аэродисперсных систем. – 2008. – Вып. 45. – С. 45 – 53.

Golovko, V.V., Vovchuk, Ya.I., Idisis, Ye.A. *Volna tleniya v organicheskom goryuchem* [Decomposition wave in an organic fuel]. *Fizika aerodispersnykh sistem – Physics of aerodisperse systems*, 2008, issue 45, pp. 45 – 53.

10. Болодьян, И.А. Руководство по оценке пожарного риска для промышленных предприятий / И.А. Болодьян, Ю.Н. Шебеко, В.Л. Карпов. – М.: ФГУ ВНИИПО, 2006. – 91 с.

Bolod'yan, I.A., Shebeko, Yu.N., Karpov, V.L. *Rukovodstvo po otsenke pozharnogo riska dlya promyshlennykh predpriyatiy* [Handbook on estimation of the fire risk for industrial enterprises]. Moscow, FGU VNIPO Publ., 2006, 91 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 01.03.2017

*Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: [obep.niigd@list.ru](mailto:obep.niigd@list.ru);  
Kristina Valeryevna Hlushenko, engineer of the 1<sup>st</sup> category; e-mail: [kristina.hlushenko@mail.ru](mailto:kristina.hlushenko@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) 311-13-52*

## MODELING THE PROCESS OF COMBUSTION OF DISPERSE VEGETABLE SUBSTANCES

**Purpose.** Working-out the mathematical model of the process of burn termination of the organic substances by interruption of air delivery to the substance being oxidized, and modeling the process by way of example of burn termination of the embankment of the grass meal.

**Methods.** Analytical investigations and modeling the process of interaction of carbon with oxygen by its burning-out.

**Results.** The analytical dependence of change of the temperature inside the burning place of the organic substance by its isolation from the oxygen access with regard for heat irradiation is obtained.

**Scientific novelty.** The dependence to calculate the complex criterion of heat generation and elimination by attenuation of the burning place of the vegetable raw materials after loss of air supply is ascertained for the first time, and its numerical value is found by transition from the flame burning to the smoldering.

**Practical value.** The calculation of the response time of the burning place after loss of air supply has the essential significance from the point of view of improvement of the existing and working-out the more efficient methods of fighting the fires.

**Keywords:** *spontaneous combustion; flame burning; smoldering; oxidation reactions; burn termination.*

## УДК [621.313:537.311.4]:537.321

Евгений Олегович Зинченко, инж.; e-mail: [evgeniy.zintchenko@yandex.ru](mailto:evgeniy.zintchenko@yandex.ru)

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-70

## ТЕМПЕРАТУРА НАГРЕВАНИЯ ПРОВОДНИКОВ В КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК

**Цель.** Определение параметров допустимого нагревания в контактном соединении электроустановки.

**Методы.** Аналитические исследования нагревания рассматриваемой модели проводника при стационарном режиме.

**Результаты.** Разработана математическая модель и аналитически получено решение для определения зависимости изменения температуры нагревания проводника в месте контактного соединения.

**Научная новизна.** Получена зависимость температуры нагревания проводника в контактном соединении от его сопротивления.

**Практическая значимость.** Найденные зависимости позволяют определить влияние повышения температуры проводника на переходное сопротивление при создании модели распределения температуры в месте контактного соединения.

**Ключевые слова:** температура нагревания проводника; количество теплоты; переходное сопротивление; контактное соединение; математическая модель.

**Постановка проблемы.** В процессе эксплуатации электроустановок, как правило, возникает необходимость увеличения электропотребления ввиду ввода новых мощностей, что приводит к увеличению токовых нагрузок в электрической сети и температуры нагревания в местах контактного соединения.

Аналитические зависимости для определения параметров допустимого нагревания (времени и температуры) в настоящее время отсутствуют. Косвенно определяют температуру нагревания контактных соединений электроустановок по:

- оплавлениям материала изоляции отходящих от контактных соединений проводников;
- оплавлениям конструктивных элементов и электроизоляционных материалов контактных соединений;
- оплавлениям проводников в контактных соединениях;
- изменению площади сечения материала подходящих к контактному соединению проводников;
- изменению поверхности контактного соединения;
- признакам локального нагревания, которые характеризуются степенью термического поражения.

**Анализ последних исследований.** В работе [1] исследован процесс нагревания электроустановок при большом переходном сопротивлении и физические модели развития пожароопасных процессов в контактном соединении.

Основными пожароопасными аварийными режимами в электросетях и электроустановках являются:

- полное короткое замыкание (далее – КЗ);
- неполное КЗ;
- перегрузка по току;
- большое переходное сопротивление;
- вихревые токи;
- искрение и т.д.

Переходное сопротивление имеет место при любом виде соединения проводников друг с другом, а также в месте контактного соединения. При условиях хорошего контакта и правильного соединения переходные сопротивления в месте контактного соединения незначительны и практически не отличаются от сопротивлений участков электрической сети. Со временем переходное сопротивление увеличивается от влажности, агрессивности окружающей среды, силы тока, неправильного монтажа, выбора контактного соединения, что приводит к постепенному увеличению температуры в месте контактного соединения.

Большое переходное сопротивление – аварийный пожароопасный режим, возникающий при переходе электрического тока с одной контактной поверхности на другую, при этом выделение теплоты в контактных соединениях электрических цепей является одной из причин возникновения аварийных режимов в электроустановках и зависит от:

- условий контактного соединения;
- материала, из которого изготовлены контактные соединения;
- геометрической формы и размеров контактов;
- усилия нажатия и прижатия контактов, при котором одна контактирующая поверхность действует на другую, что влияет на суммарную площадь соприкосновения;
- степени обработки поверхностей контактов;
- образования оксидов на поверхности контактных соединений под воздействием окружающей среды;
- температуры контакта;
- вибрационных нагрузок;
- неправильного монтажа контактного соединения;
- старения и, как следствие, пробоя изоляции проводников в месте контактного соединения;
- искрения, которое происходит при размыкании электрических цепей под нагрузкой;

- окисления соединяемых поверхностей контактного соединения.

Пожарная опасность большого переходного сопротивления связана с длительными устойчивыми тепловыми режимами в контактных соединениях, что приводит к термическому разрушению изоляции (термодеструкции) и защитных оболочек электроустановок. Источниками зажигания при этом являются нагретые проводники, электрическая дуга, раскаленные или горящие частицы, происходит оплавление изоляции проводов и контактных соединений.

Изменяется температура в контактных соединениях в одном из возможных режимов [2]:

- температура контактного соединения растет быстрее, чем токопроводящих жил, что обусловлено большим переходным сопротивлением контактного соединения;

- температура токопроводящих жил растет быстрее, чем контактного соединения, так как оно имеет малое переходное сопротивление и обеспечены хорошие условия теплоотдачи в окружающую среду;

- температура контактного соединения на начальной стадии растет быстрее, чем токопроводящих жил, с течением времени устанавливается равновесный режим и возникает баланс между выделением теплоты в контактном соединении и его отводом в окружающую среду;

- тепловой режим контактного соединения и токопроводящих жил изменяется с одинаковой скоростью, отличия в конструкции компенсированы отличиями в условиях теплоотвода (стационарный режим).

**Цель исследования.** В рассмотренных выше работах не указана зависимость изменения температуры нагревания в контактном соединении от его сопротивления. Поэтому цель настоящей работы – определение параметров допустимого нагревания контактного соединения в зависимости от его сопротивления.

**Результаты исследований.** При протекании тока часть выделяемой теплоты расходуется на повышение температуры проводника в месте контактного соединения и его электроизоляционного материала, другая часть рассеивается в окружающую среду, повышая температуру оболочки электроустановки.

При протекании длительно допустимого тока устанавливается стационарный режим, при котором температура проводника в месте контактного соединения достигает постоянного значения, обусловленного значением тока.

При протекании длительно допустимого тока в проводнике за время  $\tau$ , с, выделяется теплоты:

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

где  $Q$  – количество выделяемой теплоты в проводнике, Дж;

$I$  – длительно допустимый ток, А;

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

Количество выделяемой теплоты  $Q$  расходуется на нагревание проводника и рассеивание теплоты в окружающую среду с поверхности контактного соединения и определяется по формуле

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

где  $Q_{\text{нагр}}$  – количество теплоты, затраченной на нагревание проводника в месте контактного соединения, Дж;

$$Q_{\text{нагр}} = cmdT, \quad (3)$$

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

$m$  – масса проводника, кг;

$Q_{\text{рас}}$  – количество теплоты, рассеиваемой в окружающую среду путем лучеиспускания с поверхности проводника в контактном соединении, конвекции и теплопроводности, Дж;

$$Q_{\text{рас}} = \alpha ST_S d\tau, \quad (4)$$

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

$S$  – площадь теплоотдающей поверхности проводника, м<sup>2</sup>;

$T_S$  – температура поверхности проводника, К.

Одним из наиболее трудноопределяемых параметров в формуле (4) является коэффициент теплоотдачи с поверхности проводника. Это связано с комплексом параметров, влияющих на общий коэффициент теплоотдачи (конвекция, теплопередача, лучистый теплообмен). Как показала практика экспериментальных исследований, в общем коэффициенте теплоотдачи необходимо учитывать, кроме конвективной составляющей, лучистый теплообмен. В определенных условиях доля лучистого теплообмена может составлять до 30 % [3].

При расчете теплообмена между поверхностью проводника и окружающей средой используется закон Ньютона, согласно которому количество теплоты, отдаваемой единицей поверхности тела в единицу времени, пропорционально разности температур поверхности проводника  $T_S$  и окружающей среды  $T_C$ :

$$q_C = \alpha_C (T_S - T_C) = \alpha_C \Delta T, \quad (5)$$

где  $\alpha_C$  – конвективный коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$T_C$  – температура окружающей среды, К.

Следует отметить, что  $\alpha_C$  зависит от большого количества различных факторов: формы и размеров тела, давления и скорости движения окружающей среды, физических свойств среды и др.

Безразмерный коэффициент теплоотдачи Nu (число Нуссельта) характеризует теплообмен на границе «поверхность проводника – окружающая среда» и может быть рассчитан по формуле

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_C d}{\lambda}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности воздуха Вт/(м·К);

$d$  – диаметр проводника по внешнему слою изоляции, м.

В первом приближении представим контактное соединение в виде горизонтального проводника длиной  $l$ , м, и диаметром  $d$ , м.

Число Нуссельта для горизонтального цилиндра имеет вид

$$\text{Nu} = \left[ 0,752 + \frac{0,387(\text{Gr Pr})^{1/6}}{\left[ 1 + (0,559 / \text{Pr})^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2. \quad (7)$$

В формуле (7) Pr и Gr соответственно числа Прандтля и Грасгофа, определяемые из соотношений

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{a}; \quad (8)$$

$$\text{Gr} = \frac{gd^3(T_S - T_C)}{T_C \nu^2}, \quad (9)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;

$a$  – коэффициент температуропроводности воздуха, м<sup>2</sup>/с;

$\nu$  – кинематическая вязкость воздуха, м<sup>2</sup>/с.

Из формул (6), (7) следует

$$\alpha_C = \frac{\lambda}{d} \left[ 0,752 + \frac{0,387(\text{Gr Pr})^{1/6}}{\left[ 1 + (0,559 / \text{Pr})^{9/16} \right]^{8/27}} \right]^2. \quad (10)$$

Подставляя в уравнение (10) значения чисел Прандтля и Грасгофа из (8), (9) и вводя в целях упрощения представления выражения коэффициенты  $K_D$  и  $K_T$ , получим

$$\alpha_C = \left[ K_D \left( \frac{1}{d} \right)^{1/2} + K_T (T_S - T_C)^{1/6} \right]^2, \quad (11)$$

где  $K_D = 0,752 \lambda^{1/2}$ ; (12)

$$K_T = \frac{0,387 \lambda^{1/2}}{\left[ 1 + \left( 0,559 / \text{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \left( \frac{\text{Pr} g}{T_C \nu^2} \right)^{1/6}. \quad (13)$$

Расчетные значения введенных коэффициентов  $K_D$  и  $K_T$  в диапазоне допустимых температур эксплуатации проводников приведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные значения коэффициентов  $K_D$  и  $K_T$ 

Температура поверхности проводника, К	Pr	$K_D$	$K_T$
293	0,7147	0,1205	1,1121
313	0,7133	0,1222	1,1054
333	0,7121	0,1239	1,0990
353	0,7110	0,1255	1,0928
373	0,7100	0,1271	1,0868
393	0,7091	0,1287	1,0810
413	0,7083	0,1302	1,0754
Среднее значение		0,1254	1,0932

Подставив средние значения коэффициентов  $K_D$  и  $K_T$  в уравнение (11), получим формулу для вычисления конвективного коэффициента теплоотдачи с поверхности горизонтально расположенного цилиндрического провода в диапазоне температур от 20 до 140 °С в виде

$$\alpha_C = \left[ 0,1254 \left( \frac{1}{d} \right)^{1/2} + 1,0932 (T_S - T_C)^{1/6} \right]^2. \quad (14)$$

Максимальная плотность теплового потока, которая может излучаться с поверхности, определяется законом Стефана-Больцмана:

$$q_r = \sigma T_S^4, \quad (15)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана;  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ .

Такая поверхность называется абсолютно черным телом.

Тепловой поток, излучаемый реальной поверхностью, меньше и равен

$$q_r = \varepsilon \sigma T_S^4, \quad (16)$$

где  $\varepsilon$  – излучающая способность поверхности.

Плотность теплового потока, излучаемого с поверхности проводника в окружающую среду, может быть вычислена по формуле

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_C^4). \quad (17)$$

Запишем уравнение (17) в виде

$$q_r = \varepsilon \sigma (T_S + T_C)(T_S^2 + T_C^2)(T_S - T_C) = \alpha_r (T_S - T_C), \quad (18)$$

где  $\alpha_r$  – коэффициент лучистого теплообмена, который имеет вид

$$\alpha_r = \varepsilon \sigma (T_S + T_C)(T_S^2 + T_C^2). \quad (19)$$

Поскольку конвективный и лучистый теплообмен происходит одновременно, то полная плотность потока с поверхности проводника определяется как

$$q = q_C + q_r = \alpha_C (T_S - T_C) + \varepsilon \sigma (T_S^4 - T_C^4) \quad (20)$$

или

$$q = \alpha (T_S - T_C), \quad (21)$$

где полный коэффициент теплообмена равен

$$\alpha = \alpha_C + \alpha_r = \left[ 0,1254 \left( \frac{1}{d} \right)^{1/2} + 1,0932(T_S - T_C)^{1/6} \right]^2 + \varepsilon\sigma(T_S + T_C)(T_S^2 + T_C^2). \quad (22)$$

С учетом уравнений (1), (3), (4), (22) выражение (2) примет вид

$$I^2 R_{\text{конт}} d\tau = P = cmdT_S + \left[ \left[ 0,1254 \left( \frac{1}{d} \right)^{1/2} + 1,0932(T_S - T_C)^{1/6} \right]^2 + \varepsilon\sigma(T_S + T_C)(T_S^2 + T_C^2) \right] ST_S d\tau. \quad (23)$$

Откуда получим дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\left( I^2 R_{\text{конт}} \left[ \left[ 0,1254 \left( \frac{1}{d} \right)^{1/2} + 1,0932(T_S - T_C)^{1/6} \right]^2 + \varepsilon\sigma(T_S + T_C)(T_S^2 + T_C^2) \right] + ST_S \right) d\tau = cmdT_S. \quad (24)$$

Интегрируем выражение (24):

$$\int_0^{\tau_{\text{нагр}}} d\tau = \int_{T_0}^{T_{\text{нагр}}} \frac{cmdT_S}{I^2 R_{\text{конт}} - \alpha ST_S}. \quad (25)$$

Температуру установившегося перегревания проводника в контактном соединении  $T_{\text{уст}}$  получаем из выражения (23), где  $cmdT_S=0$  (нет изменения перегревания):

$$T_{\text{уст}} = \frac{I^2 R_{\text{конт}}}{\alpha S}. \quad (26)$$

В связи со сложностью зависимости  $\alpha = \alpha(T_S)$  необходимо численное интегрирование выражения (24). При условии  $\alpha = \text{const}$ , выполнив интегрирование уравнения (25), определяем температуру нагревания проводника в месте контактного соединения  $T_{\text{нагр}}$ , К:

$$T_{\text{нагр}} = \frac{I^2 R_{\text{конт}}}{\alpha S} - \left( \frac{I^2 R_{\text{конт}}}{\alpha S} - T_0 \right) e^{-\frac{\tau_{\text{нагр}} \alpha S}{ct}} \quad (27)$$

или с учетом формулы (26)

$$T_{\text{нагр}} = T_{\text{уст}} - (T_{\text{уст}} - T_0) e^{-\frac{\tau_{\text{нагр}}}{T}}, \quad (28)$$

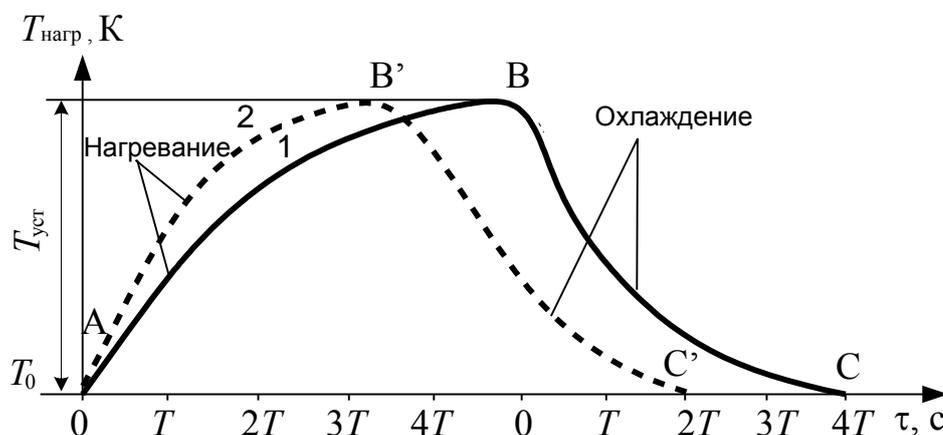
где  $T_0$  – начальная температура проводника в контактном соединении, К;

$\tau_{\text{нагр}}$  – время нагревания проводника в контактном соединении, с;

$T = ct/\alpha S$  – постоянная времени нагревания проводника в контактном соединении, с.

Значения  $T$  для различных типов проводников и условий их прокладки приведены в работе [2].

Зависимость  $T_{\text{нагр}} = f(\tau_{\text{нагр}})$  представлена на рисунке.



Изменение температуры нагревания проводника в месте контактного соединения:

1 – при  $\alpha = \text{const}$ ; 2 – при  $\alpha = \alpha(T_S)$

Процесс повышения температуры проводника в месте контактного соединения от начальной температуры до  $T_{\text{уст}}$  представлен кривой АВ.

По мере повышения температуры нагревания проводника в месте контактного соединения отдача теплоты в окружающую среду возрастает, поэтому процесс повышения температуры нагревания все больше замедляется

и наконец наступает момент, когда разница между количеством теплоты, отдаваемой поверхностью проводника в окружающую среду, и теплотой, выделяемой в проводнике, становится постоянной и с достаточной точностью можно считать температуру нагреваемого проводника установившейся, если время  $4T < \tau_{\text{нагр}} < 5T$ .

При снятии токовой нагрузки температура проводника в месте контактного соединения начинает понижаться от установившегося значения  $T_{\text{уст}}$  до начальной температуры  $T_0$  проводника в месте контактного соединения (кривая BC).

Учет зависимости  $\alpha = \alpha(T_S)$  и численное интегрирование выражения (25) показывают, что скорость нагревания контактного соединения возрастает от 22 до 25 % (кривая AB'), а время нагревания сокращается до  $3,2T < \tau_{\text{нагр}} < 4T$  (кривая BC').

При длительном режиме работы допускаем, что переходное сопротивление и коэффициент теплопроводности являются постоянными величинами. При увеличении температуры проводника в месте контактного соединения увеличивается переходное сопротивление и, следовательно, увеличивается количество выделяемой теплоты при постоянной нагрузке.

В то же время нагревание проводника в месте контактного соединения увеличивает разность между температурой проводника и температурой среды, что улучшает способность поверхности проводника рассеивать теплоту (повышает коэффициент теплопроводности). В итоге увеличение количества выделяющейся теплоты в определенной мере компенсируется увеличением теплоотдачи.

Для обеспечения нормального режима работы электроустановки, а также пожарной безопасности не допускается нагревание проводников до температур, превышающих значения, приведенные в табл. 2 [2].

Таблица 2

Допустимые температуры нагревания токопроводящих частей  
электроустановок

Части аппаратов	Наибольшая температура нагревания, К		Превышение над температурой окружающей среды, К	
	на воздухе	в масле	на воздухе	в масле
Токопроводящие (за исключением контактных соединений) и нетокопроводящие металлические части: неизолированные и не соприкасающиеся с изоляционными материалами; соприкасающиеся с трансформаторным маслом	393 -	- 363	358 -	- 328

Окончание табл. 2

Части аппаратов	Наибольшая температура нагревания, К		Превышение над температурой окружающей среды, К	
	на воздухе	в масле	на воздухе	в масле
Контактные соединения из меди, алюминия или из их сплавов с нажатием, осуществляемым болтами, винтами, заклепками и другими способами, обеспечивающими жесткость соединения:				
без покрытия	353	353	318	318
с покрытием оловом	363	363	328	328
с гальваническим покрытием серебром	378	363	343	328
Контактные соединения из меди или ее сплавов с нажатием, осуществляемым пружинами:				
без покрытия	348	348	313	313
с гальваническим покрытием серебром	378	363	343	328
с накладными пластинками из серебра или сплава марок СОК-15, СОМ-10	393	363	358	328
Выводы аппаратов, предназначенные для соединения с проводами, с нажатием с помощью болтов и другими способами, обеспечивающими жесткость соединения:				
без покрытия	353	-	318	-
с покрытием оловом	363	-	328	-
с гальваническим покрытием серебром	378	-	343	-

**Выводы.** Полученная зависимость изменения температуры проводников в месте контактных соединений при стационарном режиме позволяет определить влияние повышения температуры проводника на переходное сопротивление и создать модель распределения температуры в месте контактного соединения.

#### Список литературы / References

1. Мисюкевич, Н.С. Физические модели развития пожароопасных процессов в контактных соединениях и электрических проводках / Н.С. Мисюкевич, Д.М. Сороко // IV Междунар. науч.-практ. конф. «Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация». – Анадырь, 2009. – С. 329 – 334.

Misyukevich, N.S., Soroko, D.M. *Fizicheskiye modeli razvitiya pozharoopasnykh protsessov v kontaktnykh soyedineniyakh i elektricheskikh provodkakh* [Physical models of development of fire-hazardous processes in plug-and-jack connections and electrical wirings]. *IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. "Chrezvychaynyye situatsii: preduprezhdeniye i likvidatsiya"* [The 4<sup>th</sup> International theoretical and practical conference "Emergencies: prevention and elimination"]. Anadyr', 2009, pp. 329 – 334.

2. Анисяев, А.М. Практические указания по определению возможной причастности токов короткого замыкания к воспламенению изоляции проводников / А.М. Анисяев, А.А. Иванович, В.Ж. Хвасько. – Минск: МЧС Республики Беларусь, 2002. – 62 с.

Anisyayev, A.M., Ivanovich, A.A., Khvas'ko, V.Zh. *Prakticheskiye ukazaniya po opredeleniyu vozmozhnoy prichastnosti tokov korotkogo замыканиya k vosplamneniyu izolyatsii provodnikov* [Practical instructions on determination of the possible belonging of short-circuit currents to inflammation of the conductor covering]. Minsk, MChS Respubliki Belarus Publ., 2002, 62 p.

3. Моделирование стационарного нагрева изолированного проводника с учетом мощности теплового источника теплоты и теплообмена с окружающей средой / А.С. Дмитриченко, С.Ю. Яновский, Ю.С. Иванов, Н.И. Чайпиц // Пожарная безопасность. – 2012. – Вып. № 1. – С. 67 – 73.

Dmitrichenko, A.S., Yanovskiy, S.Yu., Ivanov, Yu.S., Chaypits, N.I. *Modelirovaniye statsionarnogo nagreva izolirovannogo provodnika s uchyetom moshchnosti teplovogo istochnika teploty i teploobmena s okruzhayushchey sredoy* [The modeling of the stationary heating of the insulated conductor with due regard for consumption of the source of heat and heat exchange with the environment]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2012, issue no. 1, pp. 67 – 73.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 22.11.2016

*Yevgeny Olegovich Zinchenko, engineer; e-mail: [evgeniy.zintchenko@yandex.ru](mailto:evgeniy.zintchenko@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) 311-39-70*

## TEMPERATURE OF HEATING THE CONDUCTORS IN PLUG-AND-JACK CONNECTIONS OF ELECTRIC INSTALLATIONS

**Purpose.** Determination of parameters of the permissible heating in the plug-and-jack connection of the electric installation.

**Methods.** Analytical investigations of the heating of the conductor model being under consideration in the stationary mode.

**Results.** The mathematical model is worked out, and the solution to determine the dependence of change of the temperature of heating the conductor in the place of the plug-and-jack connection is obtained.

**Scientific novelty.** The dependence of the temperature of heating the conductor in the plug-and-jack connection on its resistance is obtained.

**Practical value.** The dependences obtained permit to determine the influence of rise of the temperature of the conductor on the transient resistance by creation of the model of the temperature distribution in the place of the plug-and-jack connection.

**Keywords:** *temperature of heating the conductor; quantity of heat; transient resistance; plug-and-jack connection; mathematical model.*

## II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [614.841.41:536.244:536.12]:001.891.573

*Петр Семенович Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по науч. работе;*

*e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru);*

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

*Кристина Валериевна Глушенко, инж. I кат.; e-mail: [kristina.hlushenko@mail.ru](mailto:kristina.hlushenko@mail.ru);*

*Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: [orlikova.69@yandex.ua](mailto: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) 311-13-52*

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ САМОНАГРЕВАНИЯ ТВЁРДЫХ ДИСПЕРСНЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

**Цель.** Разработка математической модели очагового самонагревания дисперсных веществ органического происхождения, учитывающей тепломассообмен с окружающей средой и потерю теплоты за счёт испарения влаги.

**Методика.** Математическое моделирование процесса самонагревания вещества органического происхождения.

**Результаты.** Предложена математическая модель для сферического очага самонагревания, учитывающая источник теплоты и теплоотдачу. Аналитическое решение математической задачи сводится к описанию двух этапов процесса. Первый этап – испарение влаги, протекает с момента воздействия на горючую систему теплового потока до достижения критической температуры. Второй этап – необратимое окисление (тепловой взрыв). Показана удовлетворительная сходимость между экспериментальными и расчётными данными об изменении температуры в объёме вещества.

**Научная новизна.** Получено аналитическое решение математической модели процесса самонагревания органического вещества. Расчётным методом установлена динамика температуры в скоплении дисперсного органического вещества при его самонагревании в зависимости от теплофизических характеристик, условий протекания процесса и энергии активации.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы для предупреждения случаев самовозгорания органических веществ в процессе хранения.

**Ключевые слова:** дисперсное вещество; самовозгорание; сферический очаг; тепловой взрыв; тепломассообмен; моделирование; изменение температуры.

**Постановка проблемы.** Самовозгорание дисперсных органических веществ относится к одному из пожароопасных явлений, наблюдающихся при хранении, переработке и транспортировании этих веществ. Особая опасность самовозгорания заключается в том, что для его возникновения и развития не требуется внешнего импульса, инициирующего горение, или высоких температур. Это явление, возникающее, как правило, в больших объёмах насыпи вещества, основано на гетерогенных реакциях окисления и сопровождается образованием газообразных продуктов. Вследствие низкой теплопроводности насыпи дисперсного вещества происходит аккумуляция теплоты в её объёме и рост температуры, а также скорости химической реакции, что в итоге приводит к тепловому взрыву.

Практический интерес к процессам теплового взрыва обусловлен принципиальной возможностью рассчитать безопасные условия хранения больших объёмов дисперсных веществ, которые позволят избежать самопроизвольного возникновения горения. Необходимо определить критические параметры самовозгорания горючей системы, отклоняясь от которых эта система будет находиться в состоянии теплового равновесия с окружающей средой или начнёт самопроизвольно и быстро (практически скачкообразно) увеличивать температуру, что приведёт к тепловому взрыву. На практике это граничное состояние дисперсной системы характеризуют температурой самовозгорания или критической температурой. Это наименьшая температура окружающей среды, выше которой в имеющихся условиях и для конкретного вещества горючая система способна к самоускорению реакции окисления, сопровождающейся тепловым взрывом.

**Анализ последних исследований.** Разработка математических моделей температурных полей [1 – 5] в скоплении органических веществ показала, что для упрощения дифференциальных уравнений теплопроводности и диффузии тепломассоперенос представлен без учёта испарения влаги и выгорания вещества.

В работе [4] для математического описания процесса самовозгорания приняты следующие упрощения: реакция окисления – одностадийная и необратимая; теплоперенос осуществляется путём теплопроводности, движение реагирующего вещества и связанный с ним конвективный перенос теплоты отсутствуют; параметры, характеризующие физические свойства вещества (теплопроводность, теплоёмкость, плотность), химическую реакцию (энергия активации, предэкспоненциальный множитель, тепловой эффект) и условия протекания процесса (давление, температура окружающей среды, форма и размеры образца, коэффициент теплообмена) остаются постоянными.

Таким образом, **цель исследования** – разработка адекватной математической модели очагового самовозгорания дисперсных органических веществ, учитывающей теплоотвод за счёт испарения влаги и тепломассообмен за счёт выгорания вещества, а также сравнительный анализ результатов теоретических исследований изменения температуры в скоплении вещества с экспериментальными данными.

**Результаты исследований.** В работе [6] определение температурного поля дисперсного вещества в случае сферического очага самовозгорания радиусом  $r_0$ , когда температура  $T = T(r, \tau)$  зависит от радиальной координаты  $r$  и времени  $\tau$ , сведено к решению следующей задачи:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial T}{\partial r} \right) + w_u(\tau, T) - w_s(\tau, T), \quad 0 \leq r \leq r_0, \tau \geq 0 \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями

$$T(r, 0) = T_0, \quad \lambda \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha(T_c - T), \quad r = r_0; \quad T < \infty, \quad r = 0, \quad \tau > 0,$$

где  $c_p$  – удельная теплоёмкость вещества при постоянном давлении, Дж/(кг·К);  
 $\rho$  – плотность дисперсного вещества, кг/м<sup>3</sup>;  
 $\lambda$  – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);  
 $r_0$  – радиус сферического очага самовозгорания, м;  
 $r$  – радиальная координата, м;  
 $w_u(\tau, T)$  – источники теплоты, порождённые химическими реакциями;  
 $w_s(\tau, T)$  – теплоотдача, обусловленная испарением влаги;  
 $\alpha$  – коэффициент теплообмена, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $T_c$  – температура внешней среды, К;  
 $\tau$  – время, с (ч, сут);  
 $T$  – температура внутри скопления вещества, К.

Для источников теплоты и теплоотдачи использованы следующие функциональные зависимости от температуры:

$$\left. \begin{aligned} w_s(\tau, T) &= q_1 \exp(-E_1/RT); \\ w_u(\tau, T) &= q_2 \exp(-E_2/RT); \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $q_1$  – тепловой поток, необходимый для испарения 1 моль воды, Вт/м<sup>3</sup>;  
 $q_2$  – тепловой поток, образующийся при сгорании 1 моль дисперсного вещества, Вт/м<sup>3</sup>;  
 $E_1$  – энергия активации испарения воды, равная 2000 Дж/моль;  
 $E_2$  – энергия активации окисления вещества, равная 4630 Дж/моль;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная, равная 8,314 Дж/(моль·К).

Исследование задачи (1) сопряжено со значительными математическими трудностями. Для получения приближенного решения ограничимся упрощённой постановкой задачи, состоящей в пренебрежении зависимостью температуры вещества от координаты  $r$ .

Применяя к дифференциальному уравнению и начальному условию задачи (1) оператор усреднения по объёму, приходим к задаче для определения средней температуры:

$$\left. \begin{aligned} c_p \rho \frac{dT}{d\tau} &= w_u(\tau, T) - w_s(\tau, T) - \alpha(S/V)[T(\tau) - T_c], \quad \tau > 0; \\ T(0) &= T_0 = \text{const}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $V$  – объём скопления вещества, м<sup>3</sup>;  
 $S$  – площадь поверхности скопления вещества, м<sup>2</sup>;  
 $T_0$  – начальная температура внутри скопления вещества, К.

Уравнение (3) с учётом (2) представим в виде

$$c_p \rho \frac{dT}{d\tau} = q_2 \exp(-E_2/RT) - q_1 \exp(-E_1/RT) - \alpha(S/V)[T(\tau) - T_c].$$

Для удобства представим температуру в безразмерном виде:

$$c_p \rho \frac{d\bar{T}}{d\tau} = q_2 \exp(-\bar{E}_2/\bar{T}) - q_1 \exp(-\bar{E}_1/\bar{T}) - \bar{\alpha}(\bar{T} - \bar{T}_c), \quad (4)$$

где  $\bar{T} = T(\tau)/T_0$  – безразмерная температура внутри скопления вещества;

$T(\tau)$  – температура скопления вещества в некоторый момент времени  $\tau$  процесса самонагрева, К;

$T_0$  – начальная температура скопления вещества, К;

$\bar{T}_c = T_c/T_0$  – безразмерная температура окружающего пространства;

$T_c$  – температура окружающего пространства, К;

$\bar{E}_1 = E_1/RT_0$  – безразмерная энергия активации испарения воды;

$\bar{E}_2 = E_2/RT_0$  – безразмерная энергия активации окисления вещества;

$\bar{\alpha} = \alpha T_0 S/V$  – относительный коэффициент теплообмена между частицами дисперсного вещества, Вт/м<sup>3</sup>.

Возвращаясь к выражениям для источников теплоты и теплоотдачи, представим экспоненты в уравнениях (2) в линейном виде с коэффициентом корреляции не менее 95 %:

$$\left. \begin{aligned} w_s(\tau, T) &= q_1 \exp(-\bar{E}_1/\bar{T}) = q_1(a_1 + b_1\bar{T}) = q_1(0,33 + 0,15\bar{T}); \\ w_u(\tau, T) &= q_2 \exp(-\bar{E}_2/\bar{T}) = q_2(a_2 + b_2\bar{T}) = q_2(-0,01 + 0,19\bar{T}), \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где  $a_1, a_2, b_1, b_2$  – коэффициенты уравнений (5), которые можно найти с помощью *MSExcel*.

На рис. 1 представлены линейные зависимости  $\exp(-\bar{E}/\bar{T})$  от  $\bar{T}$  в случае испарения воды  $E_1$  и окисления органического вещества  $E_2$ .

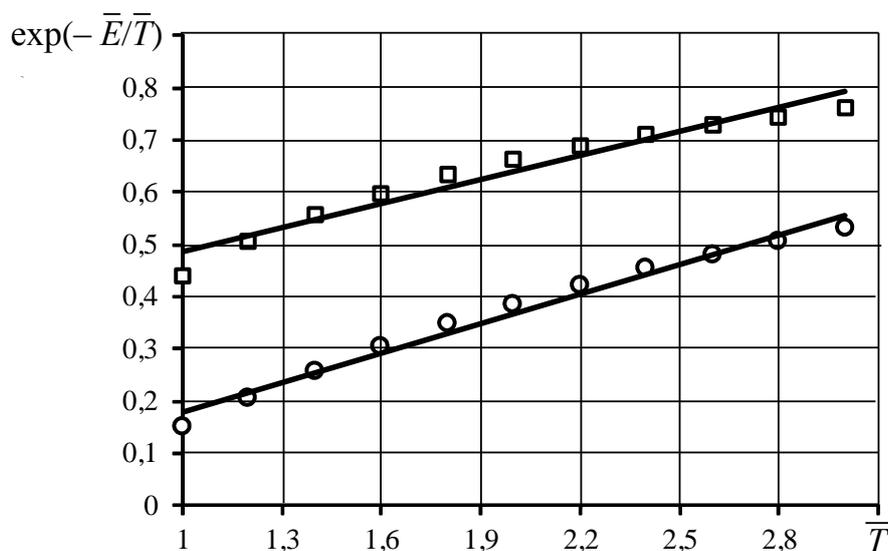


Рис. 1. Зависимость  $\exp(-\bar{E}/\bar{T})$  от  $\bar{T}$  при разных значениях  $E$ :

□ –  $E_1 = 2000$  Дж/моль (испарение воды); ○ –  $E_2 = 5000$  Дж/моль (окисление)

Раскроем скобки в уравнении (4) с учётом (5) и получим выражение

$$\frac{d\bar{T}}{d\tau} = Q_0 - A_1\bar{T} + A_2\bar{T}, \quad (6)$$

где  $Q_0 = \frac{q_2}{c_p\rho} a_2 - \frac{q_1}{c_p\rho} a_1 + \frac{\bar{\alpha}}{c_p\rho} \bar{T}_c$  – параметр, описывающий исходный тепловой поток, инициирующий процесс самонагрева;

$A_2 = \frac{q_2}{c_p\rho} b_2$  – параметр, характеризующий дополнительное поступление теплоты в систему за счёт реакции окисления вещества;

$A_1 = \frac{q_1}{c_p\rho} b_1 + \frac{\bar{\alpha}}{c_p\rho}$  – параметр, характеризующий потерю теплоты вследствие испарения воды и теплообмена между частицами вещества.

Рассмотрим подробнее случай, когда происходит испарение воды в системе до момента достижения предельной температуры  $T_1$ . Предполагается, что окисление вещества во время испарения влаги не происходит, т.е.  $q_1 \gg q_2$  ( $A_1 \gg A_2$ ), а необратимая реакция окисления начинает протекать после испарения влаги или при достижении веществом критической температуры  $T_{кр}$ . Тогда получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\bar{T}}{d\tau} &= -\frac{q_1}{c_p\rho} (a_1 + b_1\bar{T}) - \frac{\bar{\alpha}}{c_p\rho} (\bar{T} - \bar{T}_c); \bar{T}(0) = 1; \\ \frac{d\bar{T}}{d\tau} &= Q_0 - A_1\bar{T}, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где  $Q_0 = -\frac{q_1}{c_p\rho} a_1 + \frac{\bar{\alpha}}{c_p\rho} \bar{T}_c$ ;  $A_1 = \frac{q_1}{c_p\rho} b_1 + \frac{\bar{\alpha}}{c_p\rho}$ .

При достижении веществом предельной температуры  $\frac{d\bar{T}}{d\tau} = 0$  решение уравнения (7) будет иметь вид

$$\bar{T}_1 = \frac{Q_0}{\frac{q_1}{c_p\rho} b_1 + \frac{\bar{\alpha}}{c_p\rho}}, \quad (8)$$

где  $\bar{T}_1 = T_1/T_0$  – безразмерная предельная температура внутри скопления вещества.

Знаменатель в формуле (8) обозначим буквой  $a$ . Путём интегрирования уравнения (7) с учётом (8) получим формулу, описывающую изменение температуры в скоплении органического вещества до момента достижения предельной температуры:

$$T(\tau) = T_1 - (T_1 - T_0)\exp(-a\tau). \quad (9)$$

Если  $T_1 = T_{кр}$ , то решение уравнения (6), описывающего изменение температуры в скоплении органического вещества с момента воздействия на

горючую систему теплового потока (целенаправленная подача теплоты, образование теплоты за счёт микробиологических процессов, испарение воды) до протекания теплового взрыва, имеет вид

$$T(\tau) = T_{кр} - (T_{кр} - T_0)\exp(-a\tau) + 0,5c[1 + \text{sign}(\tau - \tau_{кр})]\exp[b(\tau - \tau_{кр})], \quad (10)$$

где  $\tau$  – время с момента воздействия на систему теплового потока, с (ч, сут);

$\tau_{кр}$  – время достижения системой  $T_{кр}$ , с (ч, сут);

$a = \frac{q_1}{c_p \rho} b_1 + \frac{\bar{\alpha}}{c_p \rho}$ ;  $b = \frac{q_2}{c_p \rho} b_2 + \frac{\bar{\alpha}}{c_p \rho}$  – параметры, характеризующие самонагревание и тепловой взрыв дисперсного органического вещества соответственно (определяют по экспериментальным данным методом наименьших квадратов с помощью *MSExcels*);

$c$  – параметр, характеризующий кривизну скачкообразного изменения температуры (определяют по экспериментальным данным методом наименьших квадратов с помощью *MSExcels*).

Наличие функции  $\text{sign}$  в третьем слагаемом уравнения (10) говорит о том, что во время испарения воды (до момента достижения предельной температуры) необратимая реакция окисления не происходит и третье слагаемое не учитывается. Оно вносит вклад лишь с момента достижения  $T_1$ , однако при достижении предельной температуры не всегда происходит тепловой взрыв, он имеет место лишь в том случае, когда  $T_1 = T_{кр}$ .

Для проверки адекватности полученной математической модели теплового взрыва в скоплении органического вещества необходимо сопоставить расчётные значения изменения температуры с экспериментальными данными.

Используем результаты лабораторных исследований процесса самовозгорания образцов сена из травы люцерны, которые проводили в адиабатическом калориметре [2]. Начальная разность температур между центром образца и окружающей средой не превышала 0,25 К, относительную влажность воздуха в реакционном пространстве поддерживали в пределах от 86 до 100 %. Как показали испытания (рис. 2), резкое повышение температуры наблюдали через 3 сут при относительной влажности воздуха 96,5 % и влажности образца 42 %, т.е.  $T_1 = T_{кр} = 340$  К. Показана высокая корреляция экспериментальных данных и расчётных значений, полученных по уравнению (10).

Рассмотрим изменение температуры угля шахты «Андалузия» (Польша) при его самонагревании в лабораторных условиях [7]. Установка состояла из цилиндрического сосуда, наполненного образцами угля размером  $0,15 \cdot 10^{-3}$  м и массой 0,52 кг. Диаметр сосуда и его высота 0,07 и 0,12...0,20 м соответственно. Сосуд помещали в термостат, температуру в котором автоматически поддерживали равной температуре самонагревающегося угля, что исключало теплоотвод стенкам сосуда. Через слой угля продували воздух со скоростью  $1 \cdot 10^{-4} \dots 3 \cdot 10^{-4}$  м/с. Температуру угля в сосуде измеряли термопарами и регистрировали потенциометром (рис. 3).

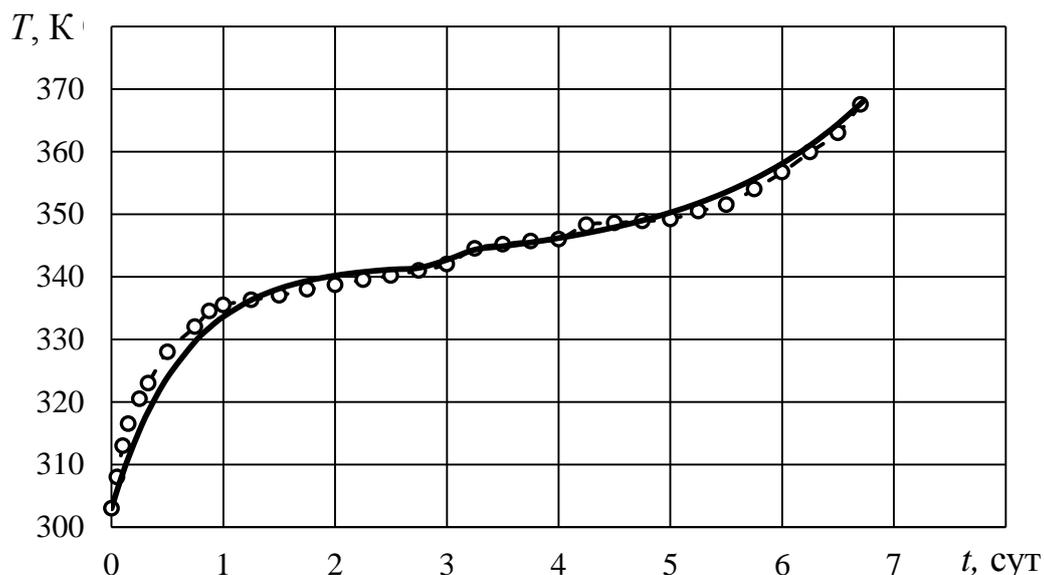


Рис. 2. Изменение температуры при самовозгорании влажного сена:  
 ○ – экспериментальные данные [2]; сплошная кривая – данные, полученные по формуле (10):  $a = 1,54$ ;  $b = 0,66$ ;  $c = 2,20$

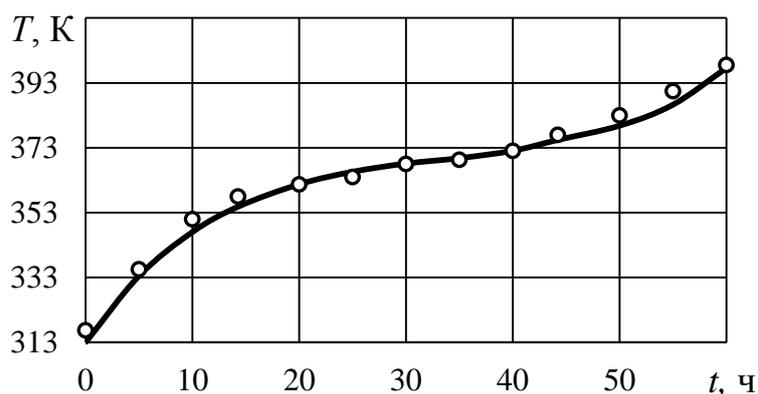


Рис. 3. Изменение температуры самонагревающегося угля шахты «Андалузия»:  
 ○ – экспериментальные данные [7]; сплошная кривая – данные, полученные по формуле (10):  
 $a = 0,084$ ;  $b = 0,12$ ;  $c = 2,38$

Из данных рис. 3 следует, что начавшееся самонагревание угля после достижения температуры 343...353 К затормаживается, что вызвано интенсивным испарением влаги. Такая картина роста температуры продолжается до 373 К, когда заканчивается процесс испарения, после чего интенсивность роста температуры вновь возрастает за счёт необратимого процесса окисления.

**Выводы.** Предложена математическая модель процесса очагового самовозгорания органических веществ, впервые учитывающая теплообмен в системе за счёт испарения влаги. Расчётным методом установлена динамика температуры в скоплении дисперсного органического вещества при самовозгорании в зависимости от теплофизических характеристик вещества, условий протекания процесса и энергии активации. Достоверность полученного аналитического решения подтверждается

удовлетворительной сходимостью расчётных значений температуры с экспериментальными данными в процессе самонагрева вещества.

### Список литературы / References

1. Гринченкова, Н.С. Исследование способов предотвращения самовозгорания горючих веществ и материалов на пожаровзрывоопасных предприятиях / Н.С. Гринченкова, Н.Ю. Луговцова // Молодёжная наука – 2014: технологии, инновации: Всерос. науч.-практ. конф. – Пермь: ИПЦ «Прокрость», 2014. – С. 358 – 363.

Grinchenkova, N.S., Lugovtsova, N.Yu. *Issledovaniye sposobov predotvrashcheniya samovozgoraniya goryuchikh veshchestv i materialov na pozharovzryvoopasnykh predpriyatiyakh* [Investigation of methods of prevention of the spontaneous ignition of combustible substances and materials at fire-explosion-hazardous enterprises]. *Molodyezhnaya nauka 2014: tekhnologii, innovatsii: Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Youth science 2014: technologies, innovations: The All-Russian theoretical and practical conference]. Perm, IPTs “Prokrost”, 2014, pp. 358 –363.

2. Горшков, В.И. Самовозгорание веществ и материалов / В.И. Горшков. – М.: ВНИИПО, 2003. – 446 с.

Gorshkov, V.I. *Samovozgoraniye veshchestv i materialov* [Spontaneous combustion of substances and materials]. Moscow, VNIPO Publ., 2003, 446 p.

3. Беляк, А.Л. Снижение эндогенной пожароопасности малометаморфизированного каменного угля и полукокса при хранении: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / Александр Леонидович Беляк. – Иркутск; Кемерово, 2004. – 109 с.

Belyak, A.L. *Snizheniye endogennoy pozharoopasnosti malometamorfizirovannogo kamennogo uglya i polukoksa pri khranenii: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.26.03* [Decrease of the spontaneous fire hazard of the low-metamorphized black coal and semi-coke by storage: cand. tech. sci. diss.: 05.26.03]. Irkutsk; Kemerovo, 2004, 109 p.

4. Откідач, Д.М. Вибухонебезпека зберігання та перероблення продукції сільськогосподарського виробництва. Теорія та практика / Д.М. Откідач, В.М. Альбоций. – Київ: УкрНДІПБ МНС України, 2006. – 288с.

Otkidach, D.M., Al'boshchiy, V.M. *Vybukhonebezpeka zberigannia ta pereroblennia produktsii sil's'kogospodars'kogo vyrobnytstva. Teoriia ta praktyka* [Explosion hazard of the storage and processing of the agricultural output. Theory and practice]. Kyiv, UkrNDIPB MNS Ukrainy Publ., 2006, 288 p.

5. Еременко, С.А. Задачи нестационарной теплопроводности при самонагревании сырья пластовыми очагами / С.А. Еременко, В.П. Ольшанский. – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 164 с.

Yeryemenko, S.A., Ol'shanskiy, V.P. *Zadachi nestatsionarnoy teploprovodnosti pri samonagrevanii syr'ya plastovymi ochagami* [Problems of the non-stationary heat-conductivity by the spontaneous heating of raw materials with stratal fire-places]. Kharkov, KhNADU Publ., 2003, 164 p.

6. Березовский, Н.А. Математические модели процессов диффузии, сопровождающиеся абсорбцией и химическими реакциями / Н.А. Березовский // Нелинейные краевые задачи математической физики и их приложения: сб. науч. тр. – Киев: Ин-т математики НАН Украины, 1998. – С. 29 – 31.

Berezovskiy, N.A. *Matematicheskiye modeli protsessov diffuzii, soprovozhdayushchiesya absorbtseyey i chimicheskimi reaktsiyami* [The mathematical models of the diffusion processes being followed by absorption and chemical reactions]. *Nelineynyye krayevyye zadachi matematicheskoy fiziki i ikh prilozheniya: sb. nauch. tr.* [Nonlinear boundary problems of the mathematical physics and their applications: collection of scientific papers]. Kiev, In-t matematiki NAN Ukrainy, 1998, pp. 29 – 31.

7. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием: сб. науч. тр. / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк: ЧП «Арпи», 2012. – 656 с.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Aktual'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem: sb. nauch. tr.* [Actual problems of the spontaneous combustion control: collected scientific papers]. Donetsk, "Arpi" private enterprise Publ., 2012, 656 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.  
Дата поступления рукописи 31.01.2017

*Pyotr Semyonovich Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director on science;*  
e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru);

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

*Kristina Valeryevna Hlushenko, engineer of the 1<sup>st</sup> category; e-mail: [kristina.hlushenko@mail.ru](mailto:kristina.hlushenko@mail.ru);*

*Viktoriya Petrovna Orlikova, scientific associate; e-mail: [orlikova.69@yandex.ua](mailto: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) 311-13-52*

## THE MATHEMATICAL MODEL OF SPONTANEOUS HEATING THE SOLID DISPERSE ORGANIC SUBSTANCES

**Purpose.** Working-out the mathematical model of the localized spontaneous heating of organic disperse substances taking into account the heat-mass exchange with the environment and the heat loss at the expense of the moisture evaporation.

**Methods.** Mathematical modeling the process of the spontaneous heating of the organic substance.

**Results.** The mathematical model for the spherical spontaneous heating source taking into account the heat source and heat irradiation is proposed. The analytical solution of the mathematical problem is brought to the description of two stages of the process. The first stage is the moisture evaporation; it is progressing from the moment of influence on the combustible system of the heat flow and lasts up to achievement of the critical temperature. The second stage is the irreversible oxidation (thermal explosion). The satisfactory convergence between the experimental and calculation data about the temperature change in the volume of the substance is shown.

**Scientific novelty.** The analytical solution of the mathematical model of the process of spontaneous heating the organic substance is obtained. The dynamics of the temperature in an accumulation of the disperse organic substance by its spontaneous heating depending on thermal and physical characteristics, conditions of process behavior and activation energy is ascertained according to the calculation method.

**Practical value.** The results obtained can be used for prevention of cases of the spontaneous combustion of the organic substances in the process of the storage.

**Keywords:** *disperse substance; spontaneous combustion; spherical fire place; thermal explosion; heat-mass exchange; modeling; change of the temperature.*

УДК 614.841.332:691.328

*Денис Александрович Плотников, ассистент; e-mail: [pldeny@bk.ru](mailto:pldeny@bk.ru);*

*Татьяна Сергеевна Башева, канд. техн. наук, замзавкафедрой; e-mail: [bashevaya@mail.ru](mailto:bashevaya@mail.ru)*

*Государственное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»*

*286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. (+38 0623) 22-74-71*

## ОГНЕСТОЙКОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ВТОРИЧНОГО СЫРЬЯ

**Цель.** Изучение возможных путей повышения огнестойкости железобетонных строительных конструкций, изготовленных с использованием отходов строительства и производства.

**Методика.** Анализ литературных источников и научный поиск возможности использования вторичного сырья для повышения огнестойкости железобетонных конструкций.

**Результаты.** Обоснована необходимость и возможность использования отходов демонтажа железобетонных конструкций, а также золы-уноса. Доказана целесообразность использования отходов строительства и производства для повышения огнестойкости бетона.

**Научная новизна.** Определены возможные пути обеспечения огнестойкости бетонов, сделанных из отходов строительства.

**Практическая значимость.** Дана характеристика существующих методов огнезащиты железобетонных конструкций. Доказана целесообразность использования отходов строительства и производства для повышения огнестойкости бетона.

**Ключевые слова:** *огнестойкость железобетонных конструкций; пожарная безопасность; утилизация отходов строительства и производства; рециклинг бетона; состав бетона.*

**Постановка проблемы.** Жизненному циклу железобетонных строительных конструкций уделяется много внимания в научных кругах. Эти конструкции обладают высокой прочностью, устойчивостью, а также долговечностью, их применяют для строительства сложных объектов, в которых прочность и надежность должны быть основополагающими факторами.

**Анализ последних исследований.** В литературе представлены результаты исследований, направленных на создание железобетонных конструкций с усовершенствованными характеристиками, более экономичных и широко применяемых изделий, а также разработку технологий повторного использования (рециклинга) отходов железобетонных конструкций [1]. Принятая мировой общественностью Концепция устойчивого развития (*sustainable development*) призывает ученых обратить внимание на проблему тотального роста отходов и исчерпания ресурсного потенциала, выработать механизмы рационального использования отходов в качестве сырья. Развитые страны разработали внутригосударственные, общеевропейские документы, регламентирующие приоритетные направления обращения с отходами. Например, в Директиве 2008/98 / ЕС «Об отходах» говорится, что к 2020 г. массовая доля восстановленных малоопасных отходов строительства и демонтажа

должна быть увеличена минимум до 70 % [2]. Под действие данной директивы в первую очередь попадают такие малоопасные и многотоннажные отходы, как лом железобетонных конструкций (50 % от общего количества отходов) и каменные материалы, кирпич (34 % соответственно). Для понимания масштабов проблемы следует отметить, что ежегодное производство бетона достигает 2 млрд м<sup>3</sup>, что намного превосходит производство других видов промышленной продукции и строительных материалов [3]. В России доля сборного и монолитного железобетона составляет более 40 % стоимости валовой продукции и основных фондов промышленности строительных материалов: производится за год около 17 млн м<sup>3</sup> сборных железобетонных конструкций, более 30 млн м<sup>3</sup> монолитного бетона и раствора и приблизительно 5 млн м<sup>3</sup> мелких бетонных блоков. При этом, по данным международной организации RILEM, в странах ЕС, США и Японии в 2010 г. ежегодный объем только бетонного лома – более 360 млн тонн. В Великобритании, например, более 50 % свалок образуется из отходов строительства и сноса, а в США количество строительных отходов достигает 200...300 млн тонн в год [2].

В то же время отслужившие свой срок железобетонные изделия представляют собой вторичное сырье, использование которого после переработки на вторичный щебень может снизить затраты на новое строительство. Вторичный щебень из бетона оказывается значительно дешевле природного, так как энергозатраты на его производство в 8 раз меньше, а себестоимость бетона с ним снижается на 25 %. Извлеченная арматура может идти на переплавку или во вторичное производство после восстановления ее свойств. К сожалению, рециклинг в странах СНГ на сегодняшний день занимает менее 1 %, в то время как в развитых странах средняя скорость рециклинга строительных отходов составляет 47 % (в Германии, Норвегии, Дании более 95 %). По данным Государственной службы статистики Украины, за 2014 г. было утилизировано только 18 % от общей массы образовавшихся строительных отходов [2]. Таким образом, можно сказать, разработка инновационных материалов и технологий при производстве железобетонных конструкций, а также переработка железобетонных отходов и создание систем рециклинга становятся перспективным и высокорентабельным производством, решающим важнейшую экологическую и экономическую задачу.

При изготовлении железобетонные конструкции по безопасности должны иметь такие начальные характеристики, чтобы при различных расчетных нагрузках и воздействиях в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений были исключены разрушения любого характера, связанные с риском причинения вреда жизни или здоровью граждан, имуществу, окружающей среде. На всех стадиях жизненного цикла железобетонные конструкции обязаны обеспечивать механическую безопасность, пожарную безопасность и огнестойкость, радиационную безопасность, термическую безопасность и взрывобезопасность, санитарно-эпидемиологическую и

экологическую безопасность. Обеспечение пожарной безопасности является крайне важным условием в современном обществе, для которого характерны высокие темпы развития и усложнения конструкций. Согласно данным Украинского научно-исследовательского института гражданской защиты, на протяжении 2016 г. в зданиях и сооружениях различного назначения возникло 31520 пожаров, что составляет 42,5 % от общего их количества. В результате пожаров в зданиях и сооружениях погибло 1818 человек, что составляет 97,1 % от общего количества погибших в результате пожаров; травмированы 1183 человека, что составляет 87,6 % от общего количества травмированных на пожарах [3]. Обрушение строительных конструкций – главная причина гибели людей и ущерба от пожаров. Наиболее распространенным строительным материалом для строительства общественных жилых и промышленных зданий является бетон. Чаще всего разрушение железобетонных конструкций от воздействия огня связано с тем, что в современном строительстве при возведении зданий и сооружений все шире используются тонкостенные железобетонные конструкции, а также сборные многослойные, пустотные, ребристые, тонкослойные панели и плиты, конструкции с внешним армированием для снижения веса, увеличения полезной площади путем уменьшения объемов конструкции и экономической выгоды. В связи с такой негативной статистикой следует, что повышение пожарной безопасности зданий и составляющих их железобетонных конструкций – актуально, и данной проблеме необходимо уделить внимание.

**Цель исследования.** Определение путей повышения огнестойкости железобетонных строительных конструкций, изготовленных с использованием отходов строительства и производства.

Обеспечение огнестойкости строительных конструкций и зданий в целом – основа системы противопожарной защиты зданий. Огнестойкость является международной пожарно-технической характеристикой, регламентируемой строительными нормами и правилами, и характеризует способность конструкций сопротивляться воздействию пожара. В связи с этим огнестойкость – базовый элемент всей системы противопожарной защиты зданий, так как служит определяющим параметром для выбора остальных элементов защиты [4].

**Материалы и результаты исследований.** Возможные пути повышения пределов огнестойкости железобетонных строительных конструкций можно классифицировать, как указано на рис. 1.

Анализ литературных источников, изучающих пути повышения огнестойкости железобетонных конструкций, позволил сделать следующие заключения. Существенно повысить огнестойкость армоцементных конструкций путем увеличения размеров поперечного сечения конструкций и толщины защитного слоя бетона арматуры невозможно в связи со значительным утяжелением армоцементных конструкций [5].



Рис. 1. Способы повышения пределов огнестойкости железобетонных конструкций

Эффективным способом повышения огнестойкости железобетонных конструкций является защита бетона от взрывообразного разрушения [5]. Например, напыление огнезащитной штукатурки позволяет добиться предела огнестойкости конструкции в диапазоне 0,75...2,5 ч. Огнезащитные напыляемые минеральные материалы с неорганическим вяжущим, обладая высокой адгезионной способностью к поверхностям, чаще всего применяют в виде цементно-перлитовых, цементно-вермикулитовых, гипсоперлитовых и гипсовермикулитовых составов. В состав таких штукатурок могут входить вяжущие, пористые заполнители, волокнистые материалы, пластификаторы и др. Их эффективность повышается с уменьшением плотности, а нанесение осуществляется полусухим торкретированием практически любой толщины при толщине одного слоя не более 15 мм.

Для повышения огнестойкости покрытий и перекрытий целесообразно устраивать подвесные потолки [5]. Вместе с тем устройство подвесных потолков связано с большими трудозатратами, увеличением стоимости строительства, а также снижает архитектурную выразительность интерьера здания.

Максимально уменьшить массу огнезащитного слоя позволяет применение вспучивающегося покрытия. Во время пожара покрытие вспучивается с образованием пористых слоев, имеющих низкую теплопроводность. В настоящее время создано большое количество огнезащитных вспучивающихся красок на различной основе, предназначенных для применения внутри зданий. Недостатки вспучивающихся огнезащитных покрытий: высокая стоимость, малая долговечность и надежность, низкая щелочестойкость, что важно при использовании для железобетонных конструкций. Поэтому их применение для огнезащиты железобетонных конструкций нецелесообразно.

Все большее применение в строительстве для огнезащиты строительных конструкций находят теплоизоляционные материалы с применением минерального вяжущего, вспученного вермикулита и перлита, минерального волокна. Огнезащитные плиты на основе вспученного вермикулита и минеральных вяжущих относятся к наиболее эффективным средствам повышения предела огнестойкости строительных конструкций. Натурные исследования огнестойкости армоцементных конструкций с применением теплоизоляционных плит из различных материалов показали низкую надежность огнезащиты армоцементных конструкций с применением фибролита. При этом облицовка армоцементных конструкций огнезащитными плитами и листами существенно повышает трудозатраты на изготовление и стоимость конструкции [5].

Огнезащитные плиты используют со средней плотностью  $300\text{--}500\text{ кг/м}^3$  на основе вспученного вермикулита, перлита, керамзита, асбеста, минеральной ваты, стекловолокна, базальтового волокна и других видов наполнителей. В Австрии фирма Jsovolta изготавливает огнезащитные плиты «Термакс» на основе вспученного вермикулита и минерального вяжущего методом горячего прессования. Плиты «Термакс» могут обеспечить пределы огнестойкости металлических конструкций 0,5; 1,0; 1,5 ч. В 80-х годах XX в. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко разработаны огнезащитные покрытия ОФП-ММ со средней плотностью не более  $300\text{ кг/м}^3$ . В состав покрытия входят в массовой доле: жидкое стекло плотностью  $1,2\text{ г/см}^3$  – 50, асбест III–V сорта – 43, нефелиновый антипирен – 7 [5]. В последующие годы созданы многочисленные модификации жидкостекольных огнезащитных составов: ОФП-10, ОПВ-180, ОФП-МВ, ОФПМ-12, «Пенокс», ЭСМА и др. Составы на основе жидкого стекла за рубежом в качестве огнезащиты не используют.

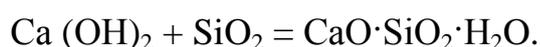
Нашли применение для огнезащиты строительных конструкций теплоизоляционные составы с использованием портландцемента, гипса, вспученного вермикулита и перлита. В Ленинградском инженерно-строительном институте были получены теплоизоляционные материалы с применением портландцемента, вспученного вермикулита, асбеста. А.И. Шиманко и И.Н. Зубарев создали теплоизоляционные вермикулитобетонные изделия со средней плотностью до  $500\text{ кг/м}^3$ , прочностью на сжатие  $0,2\text{--}0,5\text{ МПа}$  и коэффициентом теплопроводности  $0,09\text{--}0,11\text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$  на различных вяжущих [5].

Известны исследования, направленные на улучшение огнестойких свойств непосредственно железобетона. Т.В. Загоруйко предложен бетон повышенной термостойкости с применением шунгита, цемента, граншлака и асбеста, обеспечивающий стабильность бетона и его требуемые свойства для огнестойких железобетонных изделий [5]. Ю.М. Гугучкиной под руководством профессора Ю.М. Тихонова разработаны огне- и теплозащитные сухие строительные смеси и экраны на их основе с применением гипсового вяжущего и легких заполнителей – вспученного вермикулита и перлита.

Проанализировав существующие способы огнезащиты железобетонных строительных конструкций, мы пришли к выводу, что наиболее эффективным является применение композиционных материалов с использованием вулканических горных пород, что крайне нерационально в реалиях Донбасского региона.

Наиболее перспективными методами повышения огнестойкости являются способы изменения состава бетона, в том числе предусматривающие повторное использование отходов строительства или производства. Соответственно в качестве средств для повышения свойств огнестойкости железобетонных конструкций необходимо рассматривать отходы, производимые в Донбассе.

В современных бетонах взаимодействие составляющих в системе: цемент–вода–песок (рис. 2) идет весьма длительно, несмотря на соотношение песка и цемента, обычно 2:1, прежде всего из-за малой реакционной поверхности инертных частиц песка. Это объясняет, почему во многих странах ученые приходят к целесообразности ввода молотого кремнезема (а также зол, шлаков, пуццолановых пород) для повышения активности формирования цементного камня при снижении клинкерной составляющей. Массовая доля гидроксида кальция даже небольшая (15 %) значительно ослабляет строительные свойства цементного камня, и прежде всего прочность в связи с пластинчатой, слоевой морфологией кристаллов гидроксида кальция, по которым обычно проходит разлом материалов, и их склонностью к перекристаллизации при изменении влажности окружающей среды. В этой связи для повышения прочностных свойств цементного камня желательным является отсутствие в нем гидроксида кальция, но еще более эффективный вариант – связывание гидроксида кальция в более прочный и долговечный гидросиликат кальция, что может происходить по реакции



Одним из направлений повышения огнестойкости железобетонных конструкций путем изменения состава бетона является разработка геополимеров. Основы теории геополимерных материалов были заложены Дж. Давидовичем в конце 70-х годов XX в. Он применил термин «геополимер» для обозначения искусственно синтезированных полимерных материалов, имеющих структуру с повторяющимися в цепях атомами кремния и алюминия. Геополимерный бетон обладает рядом свойств, обуславливающих их преимущество перед бетоном на портландцементном вяжущем: высокая прочность на сжатие и растяжение, малая усадка, устойчивость к перепадам температуры, малое выделение газов  $\text{CO}_2$ , огнеупорность (выдерживает нагревание до 1316 °С без потери прочностных характеристик), использование при производстве отходов промышленности [6]. В состав геополимерного бетона чаще всего входят: шлак, зола-унос, жидкое стекло ( $\text{K}_2\text{SiO}_2$  или  $\text{Na}_2\text{SiO}_2$ ), гидроксид калия (KOH 45), вода (см. рис. 2) [6].

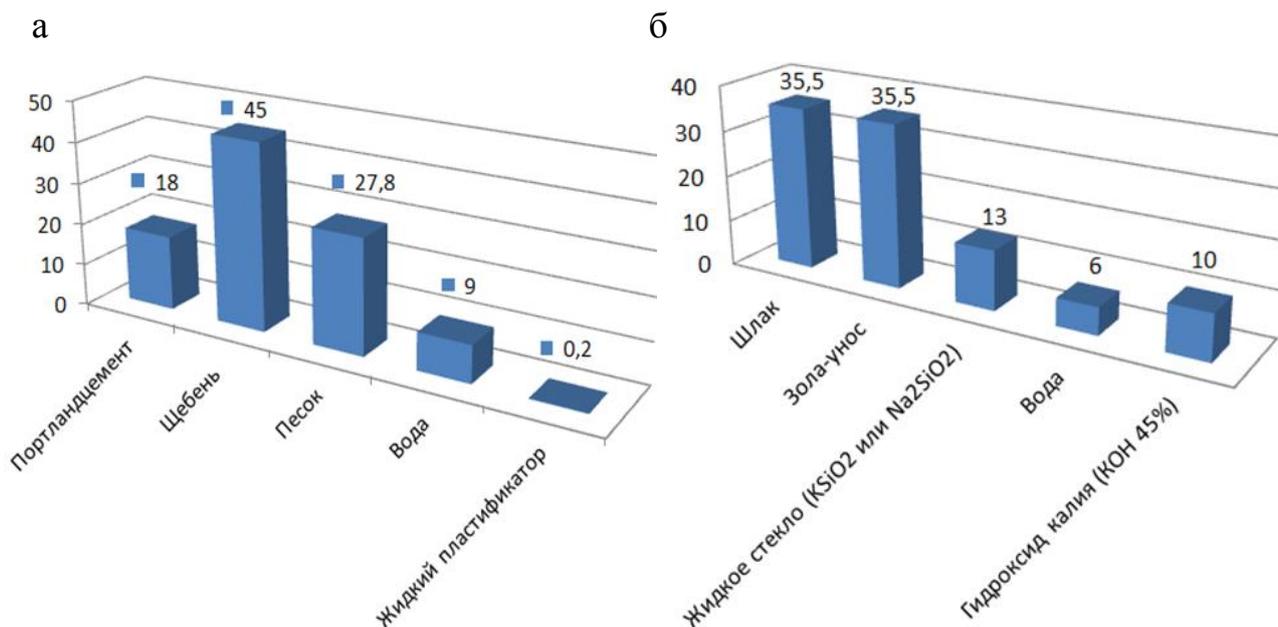


Рис. 2. Сравнительная характеристика композитного состава бетона (массовая доля):

а – портландцементного бетона; б – геополимерного бетона

Высокую эффективность применения золы-уноса для замены части мелкого заполнителя в мелкозернистых бетонах с целью увеличения прочностных показателей подтвердили исследования, выполненные Е.А. Строительской [7]. Выявлено, что зола-унос выполняет роль подложки, на которой активизируется формирование кристаллогидратов при гидратации цемента [8].

По мнению многих исследователей, на основе золы-уноса и золошлаковых смесей могут быть получены эффективные вяжущие вещества, альтернативные портландцементу.

### Выводы

1. Для повышения огнестойкости чаще всего используют конструктивные методы, такие, как увеличение защитного слоя, нанесение огнезащитных покрытий и др.

2. Основные недостатки известных методов – трудоемкость, увеличение стоимости строительства, недолговечность и ненадежность, низкая щелочестойкость.

3. Установлено, что наиболее перспективным методом является изменение химического состава бетона. Обоснованы необходимость и возможность использования отходов демонтажа железобетонных конструкций, рециклинг которых должен достигать 70 % согласно Директиве 2008/98 / ЕС «Об отходах».

4. Доказана целесообразность использования отходов строительства и производства для повышения огнестойкости бетона. В частности, установлено, что возможен следующий компонентный состав: золошлаковая смесь 22...29 %, жидкое стекло 4...9 %, гидроксид калия, портландцемент 9...16 %, бетонный

лом 31...38 %, песок 8...14 %, вода. Низкокальцевые золы играют роль алюмосиликатного композита и способствуют набору прочности материала. Дальнейшие исследования будут направлены на исследование состава бетона.

#### Список литературы / References

1. Электрогидроимпульсный способ рециклинга железобетонных конструкций / И.О. Егорушкин, Я.А. Кунгс, А.И. Орленко, А.В. Юрьев // Вестник КрасГАУ. – Красноярск, 2015. – № 6. – С. 78 – 81.

Yegorushkin, I.O., Kungs, Ya.A., Orlenko, A.I., Yur'yev, A.V. *Elektrohydroimpul'snyy sposob retsiklinga zhelezobetonnykh konstruktsiy* [The electrohydroimpulsive method of the recycling of the reinforced concrete structures]. *Vestnik KrasGAU* [Bulletin of the KrasGAU]. Krasnoyarsk, 2015, no. 6, pp. 78 – 81.

2. Башева, Т.С. Проблема отходов строительства и сноса в контексте экологической безопасности государства / Т.С. Башева // Актуальные проблемы экологии и охраны труда: сб. ст. VIII Междунар. науч.-практ. конф., 12 мая 2016 г. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2016. – С. 91 – 95.

Bashevaya, T.S. *Problemy otkhodov stroitel'stva i snosa v kontekste ekologicheskoy bezopasnosti gosudarstva* [The problems of building and pulling down waste products in the context of the environmental safety of the state]. *Aktual'nyye problemy ekologii i okhrany truda: sb. st. VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., 12 maya 2016 g.* [Actual problems of the environment and labor protection: miscellany of the 8<sup>th</sup> International theoretical and practical conference, May 12, 2016]. Kursk, Yugo-Zap. gos. un-t, 2016, pp. 91 – 95.

3. Плотников, Д.А. Характер воздействия пожаров на элементы железобетонных конструкций и средства их огнезащиты / Д.А. Плотников, Т.С. Башева, Н.С. Новиков // Вестник Института гражданской защиты Донбасса. – Донецк: ДонНТУ, 2016. – Вып. 1(5). – С. 14 – 22.

Plotnikov, D.A., Bashevaya, T.S., Novikov, N.S. *Kharakter vozdeystviya pozharov na elementy zhelezobetonnykh konstruktsiy i sredstva ikh ognezashchity* [Character of influence of the fires on elements of the reinforced concrete structures and means of their fire protection]. *Vestnik Instituta grazhdanskoy zashchity Donbassa* [Bulletin of the Institute of the civil protection of the Donbas]. Donetsk, DonNTU, 2016, issue 1(5), pp. 14 – 22.

4. Ройтман, В.М. Обеспечение безопасности людей при пожаре в высотных зданиях / В.М. Ройтман // Алгоритм безопасности. – 2006. – № 4. – С. 46 – 51.

Roytman, V.M. *Obespecheniye bezopasnosti lyudey pri pozhare v vysotnykh zdaniyakh* [Guaranteeing the safety of people by a fire in high-rise buildings]. *Algoritm bezopasnosti – Algorithm of the safety*, 2006, no. 4, pp. 46 – 51.

5. Загоруйко, Т.В. Бетон повышенной термостойкости для огнестойких железобетонных изделий [Текст] / Т.В. Загоруйко: дис. ... канд. техн. наук. – Воронеж, 2015. – 163 с.

Zagoruiko, T.V. *Beton povyshennoy termostoykosti dlya ognestoykikh zhelezobetonnykh izdeliy* [Tekst] [Concrete of higher heat stability for the fireproof

reinforced concrete articles [Text]. *Diss. kand. tekhn. nauk* [Cand. tech. sci. diss.]. Voronezh, 2015, 163 p.

6. Davidovits, J. *Geopolymer Chemistry and Applications*. – Saint Quentin, France: Geopolymer Institute, 2008. – 585 p.

7. Строителева, Е.А. Модификация структуры цементных бетонов наполнителем из золы-уноса ТЭС Дальнего Востока: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Е.А. Строителева. – Хабаровск, 2006. – 162 с.

Stroiteleva, Ye.A. *Modifikatsiya struktury tsementnykh betonov napolnitelem iz zoly-unosa TES Dal'nego Vostoka: diss. kand. tekhn. nauk: 05.23.05* [Modification of the structure of cement concretes with a filling compound from fly ash of the thermal power stations of the Far East: cand. tech. sci. diss.: 05.23.05]. Khabarovsk, 2006, 162 p.

8. Ерошкина, Н.А. Ресурсо- и энергосберегающие технологии строительных материалов на основе минерально-щелочных и геополимерных вяжущих / Н.А. Ерошкина, М.О. Коровкин. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 156 с.

Yeroshkina, N.A., Korovkin, M.O. *Resurso- i energosberegayushchiye tekhnologii stroitel'nykh materialov na osnove mineral'no-shchelochnykh i geopolimernykh vyazhushchikh* [Resource-saving and energy-efficient technologies of materials of construction on the basis of mineral-and-alkaline and geopolymeric binding agents]. Penza, PGUAS Publ., 2013, 156 p.

Рекомендовано к публикации д-ром хим. наук А.И. Сердюком.  
Дата поступления рукописи 02.05.2017

*Denis Aleksandrovich Plotnikov, assistant lecturer; e-mail: [pldeny@bk.ru](mailto:pldeny@bk.ru);*

*Tatyana Sergeevna Bashevaya, Cand. Sci. (Tech.), deputy head of subdepartment;  
e-mail: [bashevaya@mail.ru](mailto:bashevaya@mail.ru)*

*The State Educational Institution of Higher Occupational Education "The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture"*

*286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone +38 (0623) 22-74-71*

## FIRE RESISTANCE OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES FROM SECONDARY RAW MATERIALS

**Purpose.** Study of possible ways of the higher fire resistance of the reinforced concrete building structures made with the use of the building and production waste products.

**Methods.** Analysis of literature sources and scientific retrieval of possibility of the use of the secondary raw materials for the higher fire resistance of the reinforced concrete structures.

**Results.** The necessity and possibility of the use of the waste products of dismantling the reinforced concrete structures as well of fly ash are substantiated. The suitability of the use of the building and production waste products for the higher fire resistance of concrete is proved.

**Scientific novelty.** The possible ways of guaranteeing the fire resistance of concretes made from the building waste products are determined.

**Practical value.** The characteristic of the existing methods of the fire protection of the reinforced concrete structures is given. The suitability of the use of the building and production waste products for the higher fire resistance of concrete is proved.

**Keywords:** *fire resistance of reinforced concrete structures; fire safety; utilization of building and production waste products; concrete recycling; composition of concrete.*

УДК 543.544.32:[547.284.3+547.272'92+547.532.7+547.533]

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

*Олег Владимирович Храпоненко, науч. сотр.; e-mail: olghrap@mail.ru;*

*Оксана Николаевна Щербакова, инж. I кат.; e-mail: astra-jasmin@mail.ru*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-61*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ГОРЮЧИХ ЖИДКОСТЕЙ

**Цель.** Достичь максимальной чувствительности метода разделения горючих жидкостей.

**Методы.** Экспериментальные исследования с использованием газожидкостной хроматографии, математические расчеты показателей эффективности колонки, анализ и обобщение полученных результатов.

**Результаты.** На основании полученных экспериментальных данных рассчитаны: число теоретических тарелок, высота, эквивалентная теоретической тарелке, критерий разделения и высота пиков сигнала детектора при различных значениях температуры термостата колонки, расхода газа-носителя и объема вводимой дозы. Проведенный сравнительный анализ вышеназванных критериев позволил выбрать оптимальные соотношения между основными параметрами хроматографического анализа и за счет этого добиться максимально возможной чувствительности метода определения исследуемых веществ.

**Научная новизна.** Оптимизация параметров разделения ацетона, этилацетата, бензола, толуола позволила добиться максимально допустимого для определенных условий значения высоты пика сигнала детектора, снизив порог обнаружения исследуемых компонентов до  $1 \cdot 10^{-10}$  г/см<sup>3</sup> при сохранении хорошего разделения исследуемых веществ.

**Практическая значимость.** Оптимизация параметров разделения исследуемых веществ дала возможность значительно повысить чувствительность метода. Полученные результаты использованы при разработке методики определения наличия следов ацетона, этилацетата, бензола, толуола, использующихся в качестве инициаторов горения в пробах, отобранных с места пожара.

**Ключевые слова:** ацетон; этилацетат; бензол; толуол; эффективность колонки; число теоретических тарелок; высота, эквивалентная теоретической тарелке; критерий разделения; расход газа-носителя; температура термостата колонки; сигнал детектора; порог обнаружения.

**Постановка проблемы.** В литературных источниках отсутствуют методики, пригодные для обнаружения ацетона, этилацетата, бензола и толуола в пробах, которые отобраны с места пожара. Перечисленные компоненты входят в состав ряда нефтепродуктов и большинства используемых населением растворителей для лакокрасочной продукции, что делает их обнаружение актуальным.

В большинстве случаев в пробах находятся следы этих компонентов, которые невозможно определить существующими методами из-за их недостаточной чувствительности. В настоящее время наиболее перспективным путем ее повышения является оптимизация параметров хроматографического разделения.

Наибольшее влияние на процессы разделения веществ оказывают такие параметры, как расход газа-носителя, температура термостата колонок  $T$ , °С, и объем вводимой пробы, что и определило выбор данных показателей для проведения исследований. Изучение влияния перечисленных параметров на разделение веществ позволит провести их оптимизацию для снижения порога обнаружения исследуемых компонентов, т.е. повышения чувствительности метода.

**Цель исследований.** Оптимизировать параметры хроматографического разделения и достигнуть максимально возможного пика сигнала детектора для снижения порога обнаружения ацетона, этилацетата, бензола и толуола, находящихся в следовых количествах в пробах, изъятых с места пожара.

**Результаты исследований.** В ходе ранее проведенных исследований по выбору сорбента для разделения смеси ацетона, этилацетата, бензола и толуола было установлено, что достаточно эффективное разделение исследуемой смеси обеспечивает хроматон N-AW с 15 % полифенилового эфира 5ф-4э от массовой доли хроматона N-AW при длине хроматографической колонки, равной 3 м [1-2]. Соответственно оптимизацию параметров хроматографического разделения смеси этих компонентов проводили с использованием данного сорбента.

Выбор расхода газа-носителя, температуры термостата колонок, объема вводимой дозы был обусловлен тем, что перечисленные параметры, с одной стороны, оказывают наиболее существенное влияние на процессы разделения компонентов, а с другой стороны, легко поддаются количественному регулированию.

Для характеристики хроматографического разделения в процессе математической обработки полученных хроматограмм рассчитаны [3]:

- число теоретических тарелок

$$n = 5,545 \left( \frac{t_r}{W_h} \right)^2, \quad (1)$$

где  $t_r$  – время хроматографического удерживания, с;

$W_h$  – ширина хроматографического пика, измеренная на половине его высоты и выраженная в единицах времени, с;

- высота, эквивалентная теоретической тарелке (ВЭТТ)

$$H = L/n, \quad (2)$$

где  $L$  – длина слоя сорбента хроматографической колонки, мм;

- критерий разделения  $K$ , характеризующий качество разделения компонентов

$$K = \frac{\Delta t_R}{W_{h(1)} + W_{h(2)}}, \quad (3)$$

где  $\Delta t_R$  – разность времени удерживания разделяемых веществ 1 и 2, с;  
 $W_{h(1)}$  и  $W_{h(2)}$  – ширина хроматографических пиков, измеренная на половине их высоты и выраженная в единицах времени, с.

Получали характеристики хроматографического разделения смеси исследуемых компонентов при различных значениях одного из изучаемых параметров и фиксированных значениях остальных. Расход газа-носителя изменялся в диапазоне от 20 до 60 мл/мин (с интервалом 10 мл/мин) при постоянных: температуре термостата колонки (130 °С), вводимой дозе (0,5 мл), температуре испарителя (200 °С), температуре детектора (190 °С), расходе водорода (30 мл/мин), расходе воздуха (300 мл/мин), длине насадочной колонки (3 м). Концентрацию веществ исследуемой 4-компонентной смеси поддерживали постоянной на протяжении всей серии экспериментов. Определение компонентов проводили по времени удерживания, которое принято за основной параметр их идентификации. Данные этой серии исследований представлены в таблице.

Результаты разделения 4-компонентной смеси в зависимости от расхода газа-носителя при постоянной температуре термостата колонки (130 °С)

Расход газа-носителя, мл/мин	Определяемый компонент	Время удерживания $t_r$ , с	Высота пика сигнала детектора $h$ , мм	Число теоретических тарелок $n$	Высота, эквивалентная теоретической тарелке, $H$ , мм	Критерий разделения $K$
20	Ацетон	53,0	79	705,11	4,3	1,58
	Этилацетат	68,5	...	1000,33	3,0	
	Бензол	97,0	...	1314,51	2,3	
	Толуол	157,0	...	1848,01	1,6	
30	Ацетон	42,0	179	677,38	4,4	1,47
	Этилацетат	53,6	...	947,68	3,2	
	Бензол	75,2	...	1326,93	2,3	
	Толуол	122,8	...	1706,48	1,8	
40	Ацетон	36,0	220	621,65	4,8	1,41
	Этилацетат	46,0	...	857,07	3,5	
	Бензол	64,5	...	1247,63	2,4	
	Толуол	104,5	...	1478,34	2,03	
50	Ацетон	32,5	...	650,77	4,6	1,36
	Этилацетат	41,5	...	876,94	3,4	
	Бензол	58,5	...	1186,02	2,5	
	Толуол	94,0	...	1 508,02	2,0	
60	Ацетон	31,0	...	592,08	5,1	1,36
	Этилацетат	40,0	...	814,69	3,7	
	Бензол	56,5	...	1106,31	2,7	
	Толуол	90,5	...	1448,18	2,1	

Критерий разделения рассчитывали между парой наихудшим образом разделяемых компонентов – ацетоном и этилацетатом.

Максимальной эффективности хроматографического разделения соответствуют: минимальные значения высоты, эквивалентной теоретической тарелке; максимально возможные значения критерия разделения и количества теоретических тарелок (при неизменных концентрациях веществ в газовой смеси). Приоритетное значение имеет высота пиков, т.е. высота отклика сигнала детектора. Критерий разделения в исследованиях должен быть больше 1.

Анализ влияния расхода газа-носителя на параметры хроматографического разделения показал, что с ростом расхода газа-носителя высота пика сигнала детектора растет, однако эффективность колонки падает (ВЭТТ – растет, критерий разделения – падает, число теоретических тарелок – падает), поэтому выбран компромиссный вариант между эффективностью колонки и высотой отклика сигнала детектора, равный расходу газа-носителя 30 мл/мин (см. таблицу). Критерий разделения удовлетворяет требованиям во всем диапазоне расхода газа.

Характеристики процесса разделения веществ в зависимости от температуры термостата колонок определяли при расходе газа-носителя 30 мл/мин и фиксированных значениях других параметров. Температура термостата изменялась в диапазоне от 80 до 160 °С с интервалом в 10 °С.

На рис. 1 видно, что с ростом температуры в интервале 80...130 °С ВЭТТ снижается, причем минимум ВЭТТ соответствует максимальной эффективности колонки, приходится на температуру термостата колонки 130...140 °С. Начиная со 150 °С, происходит увеличение значений ВЭТТ.

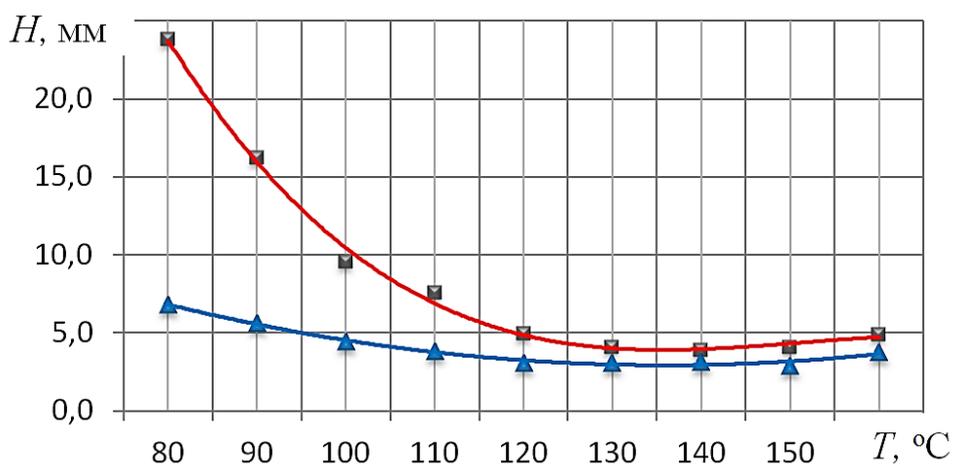


Рис. 1. Зависимость ВЭТТ от температуры термостата колонки:

■ ацетон; ▲ этилацетат

Критерий разделения в этом интервале температур всегда принимает значение больше 1 (рис. 2).

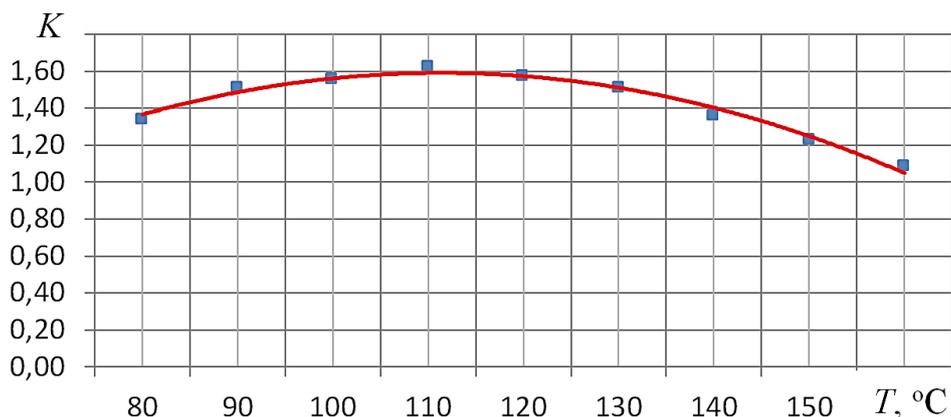


Рис. 2. Зависимость критерия разделения от температуры термостата колонки

С ростом температуры термостата колонки пик выходного сигнала детектора растет (рис. 3).

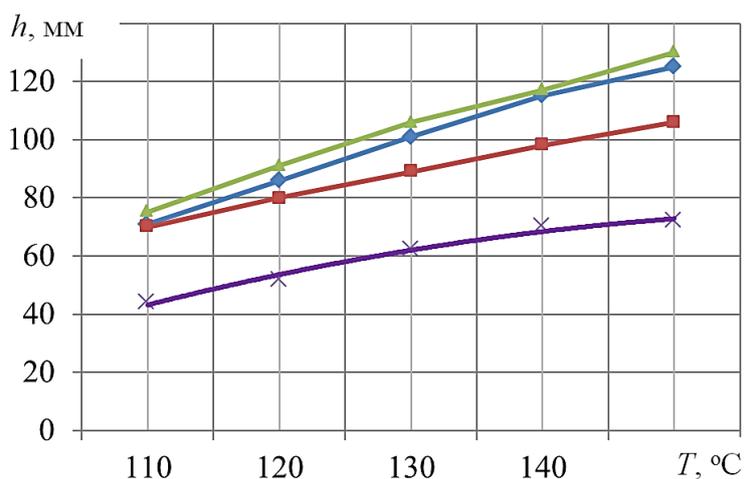


Рис. 3. Зависимость пика сигнала детектора от температуры термостата колонки:

▲ бензол; ◆ ацетон; ■ этилацетат; × толуол

Ввиду того что высота пика сигнала детектора – один из определяющих параметров в данной работе, с учетом максимальной эффективности колонки выбираем оптимальную температуру термостата колонки, равную 150 °C.

При изменении объема вводимой в хроматограф пробы в небольшом интервале значения критерия разделения и ВЭТТ практически не меняются. Последнее связано с тем, что оба показателя рассчитывают на основании значений времени удерживания компонента и ширины хроматографического пика на половине его высоты. Последние не зависят от объема введенной пробы и начинают меняться только вблизи порога обнаружения или границы «перегрузки» колонки. Поэтому мы изучали только влияние объема вводимой

пробы  $V$ , мл, на высоту пика сигнала детектора. При увеличении объема пробы пик сигнала растёт (рис. 4).

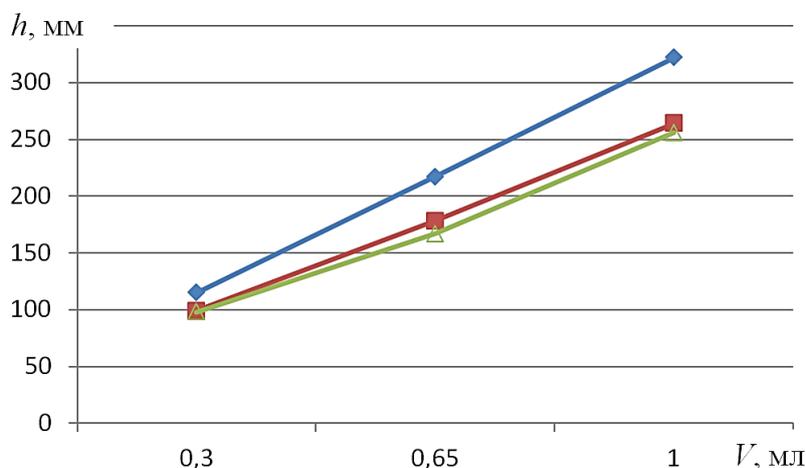


Рис. 4. Пик сигнала детектора при разных объемах вводимой пробы:

◆ ацетон; ■ этилацетат; ▲ бензол

Определение следов веществ не позволяет использовать для анализа слишком малые объемы вводимых доз. В случае присутствия в пробе значительных концентраций определяемых веществ использование больших объемов вводимых доз может привести к перегрузке колонки или взаимному накрыванию (перекрытию, наложению друг на друга) соседних пиков. Поэтому мы решили задать объем вводимой дозы в виде диапазона значений, учитывающего возможность значительных колебаний концентраций веществ в пробе.

За нижнюю границу дозы мы приняли объем 0,3 мл. Это позволило использовать для ввода пробы обычный медицинский шприц и одновременно добиться высокой точности дозирования. Верхняя граница объема дозы принята равной 3 мл, так как ее дальнейшее увеличение приводит к росту технических проблем при вводе пробы (увеличение времени ввода, сложность поддержания постоянного давления при вводе, необходимость увеличения диаметра иглы).

Поскольку невозможно заранее предугадать концентрации веществ в пробе с места пожара, для определения объема вводимой дозы в каждом конкретном исследовании приходится делать серию испытаний, постепенно наращивая дозу до достижения приемлемых результатов или получения отрицательного ответа.

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что наиболее приемлемое соотношение между высотой пика сигнала детектора и эффективностью разделения получено при расходе газа-носителя 30 мл/мин, температуре термостата колонок 150 °С и объеме вводимой пробы 0,3...3,0 мл.

**Выводы.** Оптимизированы параметры хроматографического разделения ацетона, этилацетата, бензола и толуола при сохранении удовлетворительного значения критерия разделения. За счет оптимизации параметров удалось достигнуть повышения пика сигнала детектора, что позволило снизить порог обнаружения исследуемых веществ до  $1 \cdot 10^{-10}$  г/см<sup>3</sup> и определять их следы в пробах, изъятых с места пожара.

#### Список литературы / References

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

Kozlitin, A.A., Lebedeva, V.V., Nepochatykh, I.N., Lukomskaya, T.M. *Vybor sorbenta dlya ekspressnogo opredeleniya gazokhromatograficheskim metodom initsiatorov gorenija v probakh s mesta pozhara* [Selection of a sorbent for the express-determination of burning initiators in the samples from the fire place using the gas chromatography method]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 40 – 49.

2. Исследование возможности определения легковоспламеняющихся жидкостей методом газовой хроматографии / А.А. Козлитин, В.В. Лебедева, И.Н. Непочатых, О.В. Храпоненко и др. // Вестник Института гражданской защиты Донбасса. – Донецк, 2015. – Вып. 2 (2). – С. 38 – 44.

Kozlitin, A.A., Lebedeva, V.V., Nepochatykh, I.N., Khraponenko, O.V. etc. *Issledovaniye vozmozhnosti opredeleniya legkovosplamenyayushchikhsya zhidkostey metodom gazovoy khromatografii* [Investigation of the possibility of determination of the volatile flammable liquids using the gas chromatography method]. *Vestnik Instituta grazhdanskoj zashity Donbassa* [Bulletin of the Institute of civil protection of the Donbas]. Donetsk, 2015, issue 2(2), pp. 38 – 44.

3. Спутник хроматографиста. Методы жидкостной хроматографии / О.Б. Рудаков, И.А. Востров, С.В. Федоров [и др.]. – Воронеж: Водолей, 2004. – 528 с.

Rudakov, O.B., Vostrov, I.A., Fyedorov, S.V. etc. *Sputnik khromatografista. Metody zhidkostnoy khromatografii* [Guide of the chromatographer. Methods of the liquid chromatography]. Voronezh, Vodoley Publ., 2004, 528 p.

*Aleksey Andreyevich Kozlitiin, head of department; e-mail: kozlitiin1942@mail.ru;*

*Oleg Vladimirovich Khraponenko, scientific associate; e-mail: olghrap@mail.ru;*

*Oksana Nikolayevna Shcherbakova, engineer of the 1<sup>st</sup> category; e-mail: astra-jasmin@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) 311-39-61*

## OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE CHROMATOGRAPHIC SEPARATION OF COMBUSTIBLE LIQUIDS

**Purpose.** To achieve the maximum sensitivity of the method of separation of the combustible liquids.

**Methods.** Experimental investigations with the use of the gas-liquid chromatography, mathematical calculations of the efficiency indices of the column, analysis and generalization of the results obtained.

**Results.** On the basis of the experimental data obtained number of equilibrium units, height that is equivalent to the equilibrium unit, criterion of separation and peak height of the detector signal by various values of the temperature of the thermostat of the column, consumption of the carrier gas and volume of the injected dose are calculated. The comparative analysis of the above-mentioned criteria allowed choosing the optimum correlations between the principal parameters of the chromatographic analysis and achieving the maximum possible sensitivity of the method of determination of the substances being investigated at the expense of this.

**Scientific novelty.** The optimization of the parameters of separation of acetone, ethyl acetate, benzene, toluene permitted to achieve the maximum permissible for the specified conditions values of the peak height of the detector signal reducing the detection threshold of the components studied up to  $1 \cdot 10^{-10}$  g/cm<sup>3</sup> by saving the good separation of the substances investigated.

**Practical value.** The optimization of the parameters of separation of the substances being studied enabled to increase the sensitivity of the method considerably. The results obtained were used by working-out the methods of determination of availability of the traces of acetone, ethyl acetate, benzene, toluene being used as burning initiators in the samples taken from the fire place.

**Keywords:** *acetone; ethyl acetate; benzene; toluene; efficiency of the column; number of equilibrium units; height that is equivalent to the equilibrium unit; criterion of separation; consumption of carrier gas; temperature of the thermostat of the column; signal of detector; detection threshold.*

**УДК 614.895.5 – 057.36**

*Владимир Михайлович Медгаус, нач. отд.; e-mail: vladimir\_medgaus@mail.ru;*

*Ольга Владимировна Папазова, ст. науч. сотр.; e-mail: papazova.olya@yandex.ru;*

*Николай Николаевич Попов, науч. сотр.; e-mail: popov.nikn@yandex.ru;*

*Анатолий Анатольевич Клычков, науч. сотр.; e-mail: anatoly.klichkov@yandex.ru*

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

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-92; 311-17-84*

**СПЕЦИАЛЬНАЯ ЗАЩИТНАЯ ОДЕЖДА ПОЖАРНЫХ**

**Цель.** Анализ технического состояния специальной защитной одежды пожарных подразделений МЧС ДНР и определение возможности ее безопасной эксплуатации.

**Методика.** Информационные исследования специальной защитной одежды пожарных и анализ ее технических характеристик.

**Результаты.** Исследована система обеспечения подразделений МЧС комплектами специальной защитной одежды пожарных, определены основные типы специальной защитной одежды и разработаны предложения по оптимизации данной системы.

**Новизна.** Впервые проанализировано соответствие специальной защитной одежды пожарных, находящейся на оснащении подразделений МЧС ДНР, требованиям стандартов.

**Практическая значимость.** Результаты исследований позволят повысить безопасность ведения пожарно-спасательных (аварийно-спасательных) работ, улучшить условия труда и минимизировать последствия от пожаров или чрезвычайных ситуаций.

**Ключевые слова:** *специальная защитная одежда; пожарные; боевая одежда пожарных; защитная одежда изолирующего типа; повышенная температура; аварийно-спасательные работы.*

**Постановка проблемы.** В связи с усложнившимися условиями, связанными с тушением пожаров на различных объектах, возникла необходимость в боевой одежде разных типов, которая различалась бы применяемыми материалами, конструктивным исполнением и эксплуатационными показателями.

Современную боевую одежду пожарных классифицируют в зависимости от оперативно-тактических задач и видов работ, выполняемых при тушении пожара, необходимого уровня защиты от тепловых воздействий, степени защиты от физико-механических воздействий, конструктивного исполнения, климатических зон эксплуатации.

Боевая одежда пожарных – наиболее широко применяемый вид специальной защитной одежды, ее используют в качестве средства защиты на всех пожарах как самостоятельное изделие или в комплекте с другими видами защитной одежды [1].

В зависимости от степени тепловой защиты используют специальную защитную одежду пожарного от повышенных температур трех типов исполнения: тяжелый, полутяжелый, легкий.

Проблема защиты спасателя от воздействия повышенных температур стала особенно актуальной в связи с интенсивным развитием газонефтедобывающей, перерабатывающей, нефтехимической и химической отраслей промышленности, а также высокой вероятностью возникновения пожаров на работающих или на приостановленных предприятиях.

Допустимое время работы пожарных в специальной противотепловой одежде зависит от интенсивности теплового потока, тяжести выполняемых работ, и определяют его в зависимости от площади горения нефтепродуктов (сжиженного газа) и расстояния от фронта пламени.

Специальная защитная одежда изолирующего типа, используемая при тушении пожаров и ликвидации других аварий на химически опасных объектах, обеспечивает защиту органов дыхания, глаз, слизистых оболочек и кожных покровов от попадания в организм газов, паров, аэрозолей и пыли. Эта одежда обеспечивает изоляцию (совместно со средствами защиты головы, ног, рук, органов дыхания пожарных) от опасных и вредных факторов окружающей среды (в том числе от радиоактивных веществ и материалов, а также от агрессивных сред), возникающих во время тушения пожаров.

Изолирующий скафандр – составная часть специальной защитной одежды изолирующего типа, изготовляемой из воздухонепроницаемых пленочных материалов с герметизацией швов и применением специальной фурнитуры, стойкая к воздействию радиоактивных веществ и агрессивных сред и позволяющая поддерживать избыточное давление в подкостюмном пространстве.

При эксплуатации специальной защитной одежды изолирующего типа большое значение имеют используемые материалы и фурнитура, соединения деталей и узлов скафандра, которые исключают проникновение в него воды, поверхностно-активных веществ, агрессивных сред, пыли, помогают поддерживать избыточное давление воздуха в подкостюмном пространстве, создаваемое дыхательным аппаратом.

Гарантийный срок хранения (включая хранение на складе и в режиме ожидания в условиях пожарных частей) – не менее 7 лет. По истечении 7 лет защитную одежду осматривают и определяют, нет ли дефектов в фурнитуре, повреждений частей, и проверяют основные ее защитные свойства. В случае отсутствия дефектов в фурнитуре, повреждений частей и снижения защитных свойств специальной защитной одежды изолирующего типа на 10 % изделие закладывают на дальнейшее хранение [2].

Основным стандартом, которому должна соответствовать специальная защитная одежда, является ГОСТ Р 53264, который устанавливает общие технические требования к такой одежде и материалам, используемым для ее изготовления, а также методы испытаний данных изделий.

**Анализ последних исследований.** Работы последних лет сконцентрированы на исследованиях материалов и тканей, применяемых для изготовления специальной защитной одежды [3, 4].

**Цель работы.** Изучение технического состояния специальной защитной одежды пожарных подразделений МЧС ДНР и ее соответствие современным техническим требованиям для определения возможности ее безопасной эксплуатации.

**Материалы исследования.** Проведен анализ действующей нормативной документации и предоставленных МЧС ДНР сведений об оснащении пожарно-спасательных подразделений специальной защитной одеждой различного типа (табл. 1).

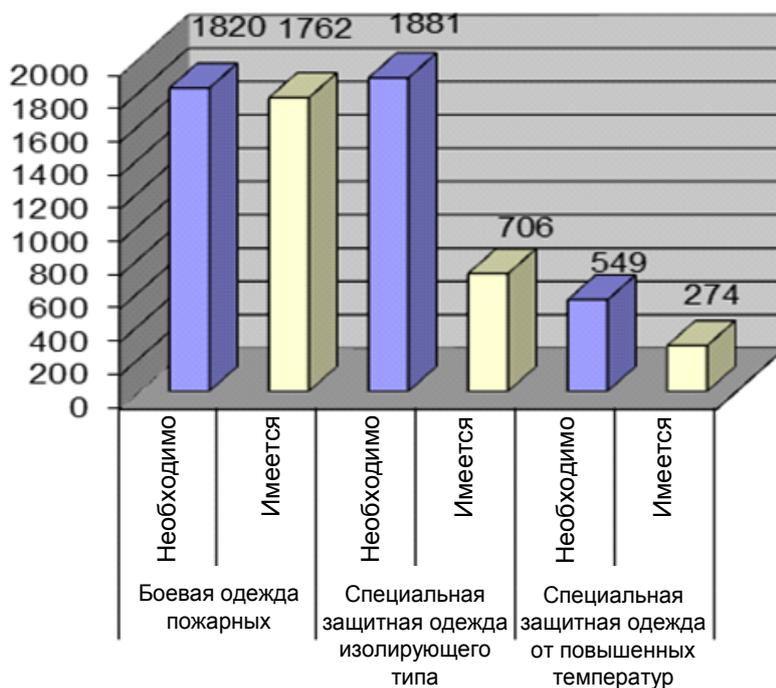
Таблица 1

Применяемая подразделениями МЧС ДНР специальная защитная одежда

Боевая одежда пожарных	Специальная защитная одежда от повышенных тепловых воздействий	Специальная защитная одежда изолирующего типа
«Лига-С»	«Индекс-1200»	ОЗК
КБ	ТОК-200	PVS
«Мрия» (брезент)	ТК-800	Л-1
«Шторм»	ТК-1000	ОП-1
«Феникс»	–	БЛЧМ
«Талан»	–	«Спасатель»
БОП-I	–	TRELLCHEM
БОП-II	–	WORKSTAR
«Евро»	–	–
USP-2-2	–	–

На рисунке представлена диаграмма оснащённости подразделений МЧС ДНР защитной одежды различного типа.

Как видно из табл. 1 и рисунка, в подразделениях МЧС ДНР преобладает боевая одежда пожарных.



Количество защитной одежды в подразделениях МЧС ДНР

В табл. 2 приведены технические характеристики некоторых типов специальной защитной одежды, которую используют в настоящее время подразделения МЧС ДНР. Приведенные типы составляют основную часть применяемой специальной защитной одежды.

Таблица 2

Соответствие технических параметров специальной защитной одежды, применяемой подразделениями МЧС ДНР, требованиям защиты от теплового воздействия

Показатель	Боевая одежда пожарного		Специальная защитная одежда пожарного от повышенных тепловых воздействий		Специальная защитная одежда изолирующего типа	
	Норма, ГОСТ Р 53264-2009	«Мрия», «Шторм», «Феникс», БОП-1	Норма, ГОСТ Р 53264-2009	Ток-200, ТК-800, ТК-1000	Норма, ГОСТ Р 53264-2009	ОЗК, Л-1
Устойчивость к воздействию теплового потока						
5,0 кВт/м <sup>3</sup> , с, не менее	240	240	–	–	240	–
10,0 кВт/м <sup>3</sup> , с, не менее	–	–	480; 900	480;900	–	–
14,0 кВт/м <sup>3</sup> , с, не менее	–	–	–	–	180	–

Окончание табл. 2

Показатель	Боевая одежда пожарного		Специальная защитная одежда пожарного от повышенных тепловых воздействий		Специальная защитная одежда изолирующего типа	
	Норма, ГОСТ Р 53264-2009	«Мрия», «Шторм», «Феникс», БОП-1	Норма, ГОСТ Р 53264-2009	Ток-200, ТК-800, ТК-1000	Норма, ГОСТ Р 53264-2009	ОЗК, Л-1
18,0 кВт/м <sup>3</sup> , с, не менее	–	–	600; 960	600; 960	–	–
25,0 кВт/м <sup>3</sup> , с, не менее	–	–	240		240	–
40,0 кВт/м <sup>3</sup> , с, не менее	5,0	–	120	120	–	–
Устойчивость к однократному воздействию открытого пламени, с, не менее	5	10	15; 20; 30	20;30	3	–
Устойчивость материала к воздействию температуры окружающей среды, с, не менее						
до 150 °С	–	–	–	–	–	–
до 300 °С	300	–	480; 600; 960	600; 900	–	–
до 400 °С (поверхность)	7	–	15	15	5	–
до 800 °С	–	–	20	20	–	–
Масса, кг, не более	5,0	4,5	4,0; 10; 16,0	10,0; 16,0	15,0; 25,0	3,5

Анализ технического уровня применяемой боевой одежды пожарных показывает, что при 97 % оснащенности, преимущественно – это изделия из хлопчатобумажного и льняного (брезентового) материала украинского и российского производства, 20 % этой одежды используют более 10 лет, из них 8 % – 20 лет. Специальная защитная одежда «Лига-С», КБ, «Мрия», «Шторм», «Феникс», «Талан» (Украина) выдерживает температуру окружающей среды от минус 40 до плюс 185 °С, интенсивность теплового потока – до 7 кВт/м<sup>2</sup> и открытое пламя – до 10 с. Существенные недостатки боевой одежды пожарных из хлопчатобумажного и льняного материала (брезента) – низкая стойкость к стирке водостойких и огнезащитных пропиток основного материала, проницаемость ткани под воздействием воды и поверхностно-активных веществ, увеличение массы изделия при намокании и жесткость при отрицательных температурах окружающей среды. Кроме того, данная одежда – с низким уровнем комфорта и защиты от тепловых факторов (открытого пламени, повышенной температуры, контакт с нагретыми поверхностями).

Лучшие характеристики имеют модели USP-2-2 (Польша), «Феникс», «Лига-С», БОП-I, БОП-II, у которых есть дополнительно водостойкий и теплоизолирующий слой, что позволяет увеличить их устойчивость к воздействию теплового потока, проникновению воды и поверхностно-активных веществ. Для изготовления данных моделей применяют недорогие материалы верха (ткани из хлопчатобумажных или льняных ниток со специальными пропитками), что делает невозможным полное их соответствие предъявляемым в настоящее время требованиям.

Следует отметить, что все указанные модели этой одежды уступают по своим техническим характеристикам аналогичным изделиям, выполненным с использованием термостойких арамидных, метаарамидных или параарамидных волокон типа NOMEX, «Пиравитекс», единственное преимущество – низкая цена.

Из анализа данных, представленных в табл. 1 и на рисунке, следует, что подразделения МЧС ДНР укомплектованы защитной одеждой от повышенных температур не в полном объеме. На оснащении подразделений находятся модели российского и украинского производства: ТОК-200; ТК-800; ТК-1000; «Индекс-1200». Из указанных моделей 41 %, учитывая срок их изготовления, эксплуатируют более 20 лет. Основные технические характеристики указанных моделей противотепловой одежды, находящейся на оснащении МЧС ДНР, соответствуют требованиям ГОСТов. Модель «Индекс-1200» – специальная защитная одежда тяжелого типа, имеет улучшенные характеристики: материал костюма выдерживает контактную теплоту до 1200 °С, коэффициент отражения до 80 %, масса – не более 10 кг. Указанные преимущества данной модели позволяют увеличивать продолжительность работы пожарного до 300 с при плотности теплового излучения до 40 кВт/м<sup>2</sup>. Срок службы изделия 10 лет.

Модель Л-1 – костюм противохимической защиты из прорезиненной ткани, не теплозащитный и не предназначен для применения при пожарах. Он состоит из цельнокроеных брюк с чулками, куртки с капюшоном и трехпалых рукавиц, изготавливают этот костюм четырех размеров. Масса модели Л-1 (3,2±0,3) кг в зависимости от ткани.

Общевойсковой защитный комплект предназначен для защиты от отравляющих веществ, биологических средств и радиоактивной пыли. Этот комплект состоит из плаща ОП-1м, защитных чулок и перчаток. Защитный плащ с капюшоном изготовлен из специальной термостойкой прорезиненной ткани и может быть использован в виде накидки с рукавами или в качестве комбинезона (при использовании специальной фурнитуры). Комплект изготавливают пяти размеров, его общая масса – не более 3,3 кг. Данная конструкция не является герметичной и устойчивой к воздействию тепловых факторов, что значительно ограничивает использование ее при пожарах.

Таким образом, модели Л-1 («Спасатель»), ОЗК, ОП-1, находящиеся на оснащении подразделений МЧС ДНР, по назначению и техническим характеристикам не являются изолирующими, а значит, не могут быть

использованы при ликвидации пожаров или чрезвычайных ситуаций с повышенным тепловым воздействием.

Костюм Work Star PVC фирмы Dräger защищает от агрессивных жидких веществ (кислот) при проведении работ на химических предприятиях. Материал имеет слой полихлорвинилового покрытия, костюм изготавливают пяти размеров.

Модификации изолирующего костюма Trelchem предназначены для защиты спасателей и пожарных от химически агрессивных веществ в жидком, парообразном, аэрозольном и газообразном состоянии. Данная модель сертифицирована Российской Федерацией.

Анализ результатов опроса представителей четырех пожарно-спасательных частей об эксплуатационных качествах применяемой защитной одежды выявил: отсутствие продолжительного стажа работы, а значит и опыта в применении такой одежды; при наличии стажа работы более трех лет – отсутствие опыта работы в различных типах защитной одежды. При этом участники опроса, имеющие определенный опыт работы в специальной защитной одежде, отмечают среди эксплуатационных характеристик важность удобства хранения и сервисного обслуживания.

**Выводы.** Эффективное применение специальной защитной одежды обусловлено рациональным выбором необходимых ее типов и видов в зависимости от региональных особенностей обслуживаемых территорий и решаемых оперативно-тактических задач.

Практически вся боевая одежда пожарных, находящаяся на оснащении МЧС ДНР, изготовлена из хлопчатобумажных и льняных тканей с термостойкими пропитками. В связи с этим такая одежда значительно уступает по комфортности и сроку службы изделиям, изготовленным из термостойких тканей.

Характерная особенность определенных типов спасательной защитной одежды – длительное ожидание применения. Поэтому большое значение должно быть уделено правильному хранению такой одежды и ее техническому обслуживанию. Наибольший рейтинг для пользователей ею по результатам проведенного анкетирования имеют такие характеристики, как удобство эксплуатации, хранения и сервисного обслуживания.

Необходимо обследовать техническое состояние защитной одежды в подразделениях МЧС ДНР, так как срок эксплуатации некоторых изделий превышает 10 лет, для определения возможности их дальнейшей безопасной эксплуатации.

Учитывая вышесказанное, целесообразно разработать меры для продления сроков безопасной эксплуатации специальной защитной одежды и положение о ее техническом обслуживании.

## Список литературы / References

1. Логвинов, В.И. Общие принципы и особенности разработки различных видов специальной защитной одежды / В.И. Логвинов // Пожарная безопасность. – 2002. – № 5. – С. 51 – 57.

Logvinov, V.I. *Obshchiye printsipy i osobennosti razrabotki razlichnykh vidov spetsial'noy zashchitnoy odezhdy* [General principles and peculiarities of working-out the various sorts of the special protective clothing]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2002, no. 5, pp. 51 – 57.

2. Поповский, Д.В. Боевая одежда и снаряжение пожарного / Д.В. Поповский, В.Ю. Охломенко. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. – 86 с.

Popovskiy, D.V., Okhlomenko, V.Yu. *Boyevaya odezhda i snaryazheniye pozharnogo* [Fighting clothing and equipment of the fireman]. Moscow, Akademiya GPS MChS Rossii Publ., 2004, 86 p.

3. Результаты исследований и перспективы развития материалов для специальной защитной одежды пожарных / В.И. Логвинов, И.Д. Игнатова, К.Э. Архиреев, Е.С. Михайлов, Л.А. Доценко // Пожарная безопасность. – 2012. – № 3. – С. 100 – 106.

Logvinov, V.I., Ignatova, I.D., Arkhireyev, K.E., Mikhaylov, Ye.S., Dotsenko, L.A. *Rezultaty issledovaniy i perspektivy razvitiya materialov dlya spetsial'noy zashchitnoy odezhdy pozharnykh* [Results of investigations and prospects of development of materials for the special protective clothing of the firemen]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2012, no. 3, pp. 100 – 106.

4. Михайлов, Е.С. Влияние температурно-влажностного режима внутреннего пространства термоагрессивостойких костюмов на их теплозащитные свойства / Е.С. Михайлов, В.И. Логвинов // Пожарная безопасность. – 2014. – № 1. – С. 56 – 62.

Mikhaylov, Ye.S., Logvinov, V.I. *Vliyaniye temperaturno-vlazhnostnogo rezhima vnutrennego prostranstva termoaggressivostoykikh kostyumov na ikh teplozashchitnyye svoystva* [Influence of the temperature-humidity conditions of the internal space of the thermal aggressive-stable suits on their heat-protective properties]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2014, no. 1, pp. 56 – 62.

*Vladimir Michailovich Medgaus, head of department; e-mail: vladimir\_medgaus@mail.ru;*

*Olga Vladimirovna Papazova, senior scientific associate; e-mail: papazova.olya@yandex.ru;*

*Nikolay Nikolayevich Popov, scientific associate; e-mail: popov.nikn@yandex.ru;*

*Anatoly Anatolyevich Klychkov, scientific associate e-mail: [anatoly.klichkov@yandex.ru](mailto:anatoly.klichkov@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. Phones (+38 062) 311-39-92; 311-17-84*

## **SPECIAL PROTECTIVE CLOTHING OF THE FIREMEN**

**Purpose.** Analysis of the technical state of the special protective clothing of the fire-fighting sub-divisions of the Ministry of Emergency Situations of the DPR and determination of the possibility of its safe use.

**Methods.** Information investigations of the special protective clothing of the firemen and analysis of its technical data.

**Results.** The system of provision of the sub-divisions of the Ministry of Emergency Situations of the DPR with the complete sets of the special protective clothing of the firemen is investigated, the main types of the special protective clothing are determined, and the proposals on optimization of the system given are worked out.

**Novelty.** The correspondence of the special protective clothing of the firemen being on the equipment of the sub-divisions of the Ministry of Emergency Situations of the DPR with the requirements of the standards is analyzed for the first time.

**Practical value.** The results of the investigations will allow improving the safety of carrying-out the fire-rescue (search-and-rescue) operations, bettering the labor conditions and minimizing the consequences of fires or emergencies.

**Keywords:** *special protective clothing; firemen; fighting clothing of the firemen; protective clothing of the isolating type; elevated temperature; search-and-rescue operations.*

### III. Охрана труда

УДК 614.895.5:[621.5:546.212]

*Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора по научной работе,  
e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru);*

*Геннадий Вячеславович Завьялов, науч. сотр.; e-mail: [zavyalov57@mail.ua](mailto:zavyalov57@mail.ua)*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-70-29; 311-39-62*

## ПАРАМЕТРЫ ПРОТИВОТЕПЛООВОГО КОСТЮМА С ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

**Цель.** Обоснование параметров противотеплового костюма водяного охлаждения, предназначенного для защиты спасателя в ходе ведения аварийно-спасательных работ при высоких температурах.

**Методика.** Экспериментальные исследования параметров костюма.

**Результаты.** Определена техническая характеристика костюма.

**Научная новизна.** Впервые установлены основные параметры – время защитного действия и масса костюма, в котором использована проточная, подаваемая по поливинилхлоридным трубкам вода для охлаждения спасателя при ведении аварийно-спасательных работ в зоне воздействия высоких температур.

**Практическая значимость.** Использование противотеплового костюма с водяным охлаждением позволит обеспечить безопасность и эффективность спасателя при высоких температурах.

**Ключевые слова:** температура; противотепловой костюм; водяное охлаждение; испытатель; тепловая камера; полигон.

**Постановка проблемы.** Оперативные сотрудники пожарно-спасательных подразделений МЧС в ходе ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций подвергаются воздействию опасных и вредных факторов. Наиболее вероятные из них: пламя, искры, высокая температура воздуха [1, 2]. Результаты расследования несчастных случаев показывают, что около 29 % спасателей при ликвидации аварий и пожаров получали ожоги и тепловые удары из-за воздействия открытого пламени или интенсивного теплового лучистого потока.

Отсутствие противотепловых костюмов с активным охлаждением спасателей при повышенном тепловом воздействии нередко приводит к потере их здоровья и гибели, большим материальным затратам. В частности, 8 июня 2015 г. в ходе тушения пожара на территории нефтебазы ООО «БРСМ-нефть» в Васильковском районе Киевской области в результате воздействия теплового излучения и конвективных потоков от горящего топлива пострадало 20 спасателей, из них 6 погибли, а 22 сентября 2016 г., в результате ликвидации пожара в складских помещениях, расположенных по ул. Амурской Москвы, при обрушении кровли на площади около 1,5 тыс. м<sup>2</sup> погибли восемь спасателей МЧС.

**Анализ последних исследований.** Анализ Киевского университета технологии и дизайна, Львовского университета безопасной жизнедеятельности требований, изложенных в ГОСТ Р 53264-2009 «Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний», показывает, что решение задачи обеспечения безопасных условий труда в условиях повышенных, особенно высоких температур, без применения активного теплосъема невозможно.

Результаты выполненных ранее теоретических исследований теплообменных и гидравлических процессов в костюме с водяным охлаждением показали эффективность применения воды, используемой пожарно-спасательными подразделениями при тушении пожаров [3].

Для подтверждения адекватности результатов теории и определения параметров разработана конструкция и изготовлен костюм, проведены его испытания.

**Цель исследования.** Обоснование параметров противотеплового костюма с водяным охлаждением, предназначенного для тушения пожара или защиты производственного оборудования в ходе ведения аварийно-спасательных работ.

**Материалы и результаты исследований.** Костюм состоит из двух комбинезонов: наружного, выполненного с теплоотражающей поверхностью, материал которой пропитан металлизированной смесью, и внутреннего – с водяным охлаждением.

В качестве наружного комбинезона использовали костюм ТК-800 производства России, массой 6,5 кг.

Комбинезон водяного охлаждения представляет собой двухслойное изделие сшитыми между слоями поливинилхлоридными трубками с внутренним диаметром 3 мм. Вода, отобранная из рукавной линии с помощью специальной вставки через входящий штуцер, проходит по восьми направлениям, охлаждая различные части тела человека, и по выводящим штуцерам, расположенным на правой и левой голени ног, выходит наружу в окружающую среду. Масса контура водяного охлаждения 3 кг. Количество воды в трубках и штуцерах – около 1,9 л.

В соответствии с Программой и методикой испытаний противотеплового костюма с водяным охлаждением проведены его испытания в тепловой камере при температуре 37 и 40 °С, а также на опытно-экспериментальном полигоне НИИГД «Респиратор» при необходимой температуре на поверхности костюма 200 °С. При этом считали, что общее время защитного действия костюма равно сумме, полученной при двух испытаниях.

В качестве критериев оценки теплового состояния испытателя приняты физиологические параметры: частота сердечных сокращений и температура воздуха в пододежном пространстве (между наружной оболочкой и комбинезоном водяного охлаждения), допустимые значения которых не должны превышать 150 мин<sup>-1</sup> и 40 °С соответственно [4, 5].

Тепловая камера оборудована эргометром, ступенькой «степ-тест», площадкой для переноса кирпичей (рис. 1). В ходе испытаний контрольно-измерительной аппаратурой фиксировали следующие физиологические показатели: частоту сердечных сокращений, кардиограмму сердца, температуру кожи, артериальное давление и температуру воздуха пододежного пространства.

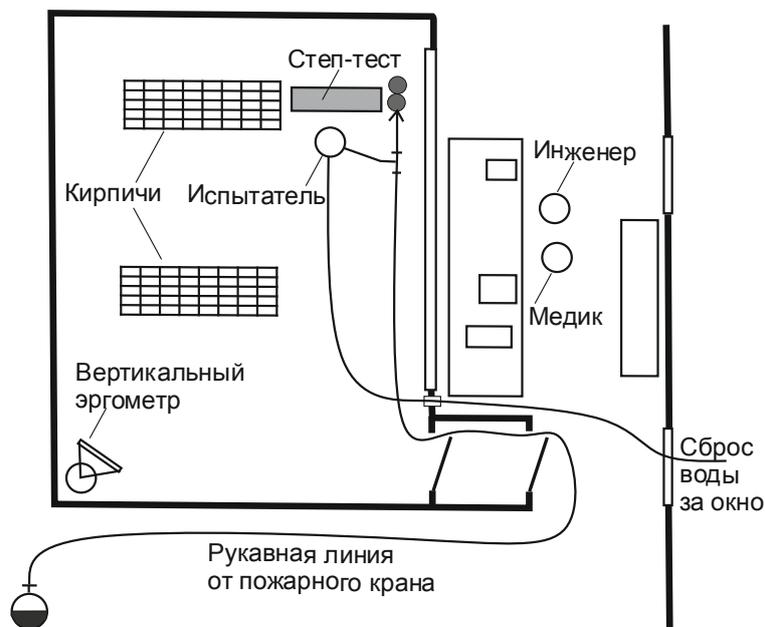


Рис. 1. Схема размещения оборудования в тепловой камере

Частоту сердечных сокращений определяли с помощью радиотелеметрической аппаратуры для дистанционного контроля, имеющей погрешность не более  $0,2 \text{ с}^{-1}$ , температуру кожи и воздуха пододежного пространства – с помощью электротермометра медицинского ТПЕМ-1 (с датчиками), результаты сообщал испытуемый по переговорному устройству.

Испытуемый, работая в тепловой камере в течение 10 мин, выполнял упражнение на ступеньке «степ-тест» высотой 20 см в ритме 20 подъемов – спусков в минуту (рис. 2) в изолирующем регенеративном респираторе Р-30 с ледяным охлаждающим элементом, что позволяло имитировать выполнение работы средней тяжести.

Для снижения давления воды в комбинезоне водяного охлаждения в водоотборном устройстве устанавливали дросселирующую шайбу диаметром 1,9 мм, что позволило создать его значения у пожарного ствола (рукавной заглушки)  $0,4 \dots 0,0275 \text{ МПа}$  и обеспечивать для охлаждения пододежного пространства  $0,23 \text{ м}^3/\text{ч}$  ( $3,88 \text{ л/мин}$ ) воды из рукавной линии от пожарного крана. После выполнения упражнения и 5 мин отдыха в формуляр испытаний заносили объективные и субъективные показания состояния испытуемого.

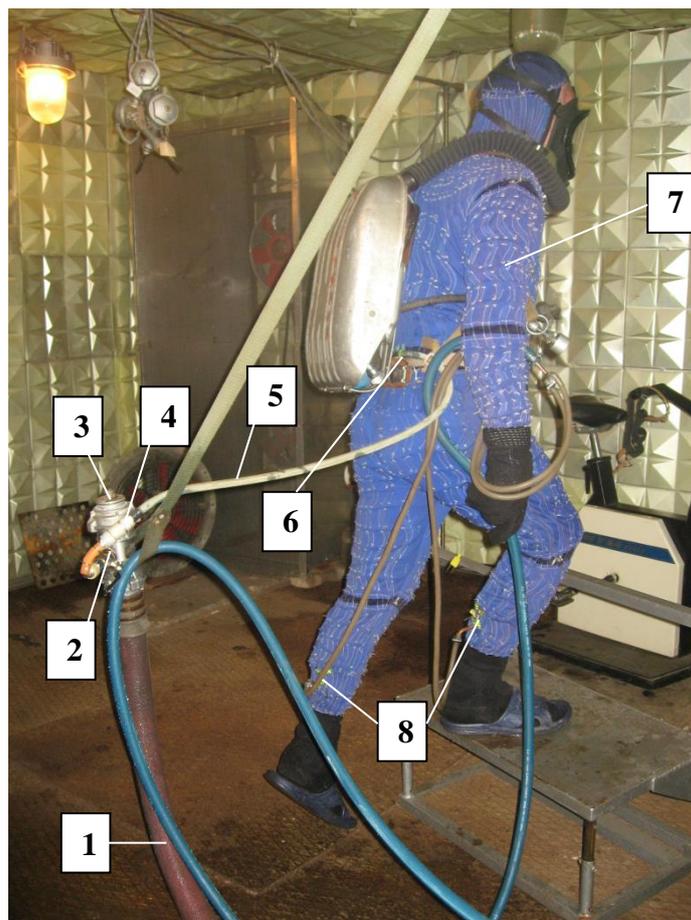


Рис. 2. Выполнение упражнения «степ-тест»:

1 – пожарный рукав; 2 – водоотборное устройство; 3 – рукавная заглушка; 4 – быстроразъемное соединение; 5 – шланг, подающий воду в комбинезон водяного охлаждения; 6 – входной коллектор; 7 – комбинезон водяного охлаждения; 8 – выпускные коллектора

Работу на вертикальном эргометре (рис. 3) испытал в ритме 14...16 подъемов – спусков в минуту. После 5 мин перерыва испытал цикл упражнений повторял.

Температура воды на входе в костюм была 22 °С, на выходе 27 °С.

Время защитного действия при работе в комбинезоне водяного охлаждения в тепловой камере при температуре 37 °С и влажности 75 % 65 мин, а при температуре 40 °С и влажности 65 % 70 мин.

На опытно-экспериментальном полигоне (схема размещения оборудования приведена на рис. 4) на ровной площадке 50×50 м из пиломатериалов и скатов колес автомобилей сформировали штабель размерами в плане 2×2 м и высотой 2,5 м. В качестве внешнего комбинезона использовали теплоотражательный костюм ТК-800, который применяют пожарно-спасательные подразделения МЧС.



Рис. 3. Выполнение упражнения на вертикальном эргометре

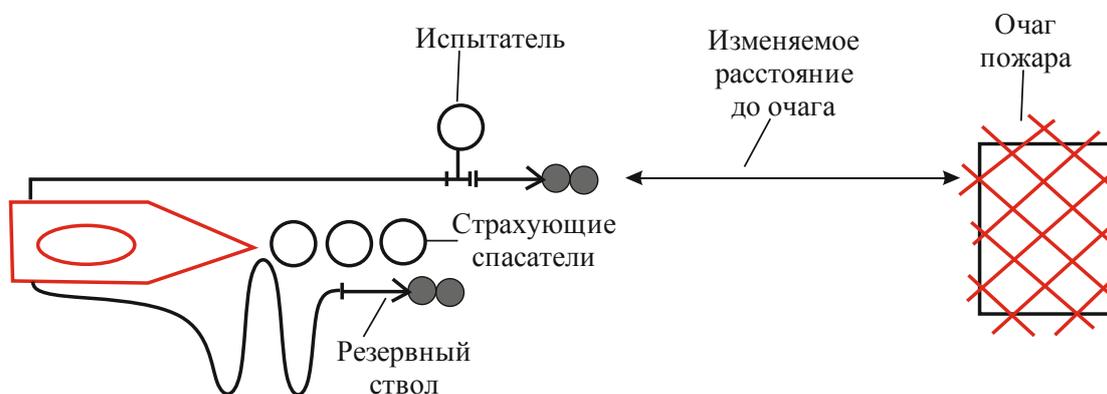


Рис. 4. Схема размещения оборудования на опытно-экспериментальном полигоне

Изменение необходимой температуры достигали приближением испытателя к очагу пожара или удалением от него и определяли по показаниям пирометра. Физическую нагрузку средней тяжести имитировали перемещением испытателя с пожарным стволом вдоль фронта очага пожара (рис. 5).



Рис. 5. Перемещение испытателя с пожарным стволом вдоль фронта очага пожара

В качестве критерия противотепловой способности костюма выбрана температура воздуха пододежного пространства. Если она не превышает  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , то костюм выполняет свои функции. Эту температуру измеряли аналогично, как и в камере. Целостность внешней оболочки определяли визуально.

Температура воды на входе из рукавной линии пожарного автомобиля в костюм была  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , на выходе  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , температура воздуха в тени  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Время защитного действия при работе в костюме вблизи очага пожара при температуре на поверхности  $180\text{...}220\text{ }^{\circ}\text{C}$  равнялось 23 мин, а суммарное с учетом данных, полученных при испытаниях в тепловой камере, – около 90 мин.

В этом случае также применили респиратор Р-30 с ледяным элементом охлаждения. Масса костюма (без средств защиты органов дыхания) 12 кг.

При испытании не ощущается существенного ограничения движений в костюме при наклонах, приседаниях, поворотах головы и туловища.

Контроль во время проведения испытаний в тепловой камере и на опытно-экспериментальном полигоне, соблюдение правил безопасности, измерение физиологических параметров осуществляли соответственно медицинский работник, специалист по охране труда и физиолог.

На основании результатов исследований (максимальная погрешность не превышает 16 %) получена техническая характеристика костюма (см. таблицу).

Техническая характеристика противотеплового костюма  
с водяным охлаждением

Параметр	Значение параметра
Время защитного действия костюма при воздействии температуры воздуха окружающей среды 200 °С, средней нагрузке и с температурой поступающей в него воды 20...25 °С, мин, не менее	60
Масса костюма (без респиратора), кг, не более	12
Масса снаряженного костюма (с респиратором, светильником и переговорным устройством), кг, не более	25
Средний срок службы, годы, не менее	5

### Выводы

1. Разработана конструкция противотеплового костюма с водяным охлаждением, состоящего из внешнего теплоотражающего комбинезона и внутреннего – водяного охлаждения, оснащенного трубками диаметром 3 мм на расстоянии не более 30 мм друг от друга с температурой поступающей воды 20...25 °С.

2. На основании результатов проведенных экспериментальных исследований костюма в тепловой камере и на опытно-экспериментальном полигоне НИИГД «Респиратор» определены его технические характеристики: время защитного действия с учетом времени таяния льда в холодильнике изолирующего регенеративного респиратора Р-30 – не менее 60 мин, масса снаряженного костюма – не более 25 кг.

3. Применение активного теплосъема в противотепловом костюме с водяным охлаждением значительно повышает время защитного действия (не менее 60 мин) при длительном воздействии высоких температур по сравнению с существующим костюмом, находящимся на оснащении МЧС (ТК-800 16 мин), с одновременным обеспечением безопасных и комфортных условий труда спасателя.

### Список литературы / References

1. Терехнев, В.В. Справочник руководителя тушения пожара / В.В Терехнев. – М.: Пожкнига, 2004. – 248 с.

Terebnev, V.V. *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara* [Handbook of the head of fighting the fire]. Moscow, Pozhkniga Publ., 2004, 248 p.

2. Повзик, Я.С. Пожарная тактика / Я.С Повзик. – М.: Спецкнига, 1999. – 414 с.

Povzik, Ya.S. *Pozharnaya taktika* [Fire tactics]. Moscow, Spetskniga Publ., 1999, 414 p.

3. Патент на корисну модель № 109668 Україна, МПК А62В17/00, А41D13/00. Теплозахисний костюм / В.К. Костенко, О.Л. Зав'ялова, Г.В. Зав'ялов, Т.В.Костенко, В.М. Покалюк. – № u2016 03119; заявл. 25.03.2016; опубл. 25.08.2016, Бюл. №16.

Kostenko, V.K., Zav'ialova, O.L., Zav'ialov, G.V., Kostenko, T.V., Pokaliuk, V.M. *Teplotzakhyshnyi kostium* [Heat protective suit]. Utility model patent, Ukraine, no. 109668, 2016.

4. Индивидуальная противогазотепловая защита: монография / Ю.Ф. Булгаков, С.В. Борщевский, И.Ф. Марийчук, Е.В. Курбацкий, Д.Д. Выговская.– Донецк: Норд Компьютер, 2015. – 386 с.

Bulgakov, Yu.F., Borshchevskiy, S.V., Mariychuk, I.Ph., Kurbatskiy, Ye.V., Vygovskaya, D.D. *Individual'naya protivogazoteplovaya zashchita: monografiya* [The individual gas-heat protection: monograph]. Donetsk, Nord Computer Publ., 2015, 386 p.

5. Грачев, В.А. Газодымозащитная служба / В.А. Грачев, Д.В. Поповский. – М.: Пожкнига, 2004. – 376 с.

Grachev, V.A., Popovskiy, D.V. *Gazodymozashchitnaya sluzhba* [Gas-smoke protective service]. Moscow, Pozhkniga Publ., , 2004, 376 p.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Ф. Марийчуком.  
Дата поступления рукописи 03.03.2017

*Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director on science;*  
e-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru);

*Gennady Vyacheslavovich Zavyalov, scientific associate; e-mail: [zavyalov57@mail.ua](mailto:zavyalov57@mail.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. Phones (+38 062) 311-70-29; 311-39-62*

## PARAMETERS OF A HEAT PROTECTIVE SUIT WITH WATER COOLING

**Purpose.** Substantiation of the parameters of the heat protective suit with water cooling intended to protect the rescuer in the course of carrying-out the emergency-and-rescue operations at high temperatures.

**Methods.** Experimental investigations of the parameters of the suit.

**Results.** The technical data of the suit are determined.

**Scientific novelty.** The principal parameters, i.e. duration and mass of the suit, in which the running water being fed through the polyvinylchloride tubes to cool the rescuer when carrying-out the emergency-and-rescue operations in the zone of influence of high temperatures is used are ascertained for the first time.

**Practical value.** The application of the heat protective suit with water cooling will permit to guarantee the safety and effectiveness of the rescuer at the high temperatures.

**Keywords:** *temperature; heat protective suit; water cooling; tester; heat chamber; testing ground.*

**УДК 622.012: 504.5**

*Сергей Семенович Гребёнкин, д-р техн. наук, ведущий науч. сотр.; e-mail: [orbush@mail.ru](mailto:orbush@mail.ru);*

*Евгений Валентинович Кравченко, канд. экон. наук, завастипрантурой;*

*e-mail: [kravchenkoev39@mail.ru](mailto:kravchenkoev39@mail.ru);*

*Дмитрий Сергеевич Буряк, науч. сотр.; e-mail: [buryak\\_ds@rambler.ru](mailto: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) 311-44-92; 311-39-86*

## **ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УЩЕРБ ОТ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПРЕДПРИЯТИЯМИ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ**

**Цель.** Разработать метод оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды предприятиями угольной промышленности.

**Методы.** Анализ литературных источников и методов оценки экономического ущерба от загрязнения и истощения окружающей природной среды.

**Результаты.** На основе анализа существующих классических методов оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды выбран наиболее приемлемый применительно к предприятиям угольной промышленности – эмпирический (укрупненный).

**Научная новизна.** Разработан адаптированный метод оценки экономического ущерба от загрязнения и истощения окружающей природной среды предприятиями угольной промышленности.

**Практическая значимость.** Полученный метод позволяет в зависимости от условий, характерных для конкретного угольного предприятия, проводить комплексную и достаточно точную оценку экономического ущерба от загрязнения и истощения окружающей природной среды. Приведенные зависимости учитывают не только основные затраты, вызываемые воздействием загрязненной среды, но также затраты, возникающие при вторичном загрязнении.

**Ключевые слова:** *природная среда; экология; экономический ущерб; методы оценки; предприятия угольной промышленности.*

**Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами.** Предприятия угольной промышленности являются источниками комплексного негативного воздействия на окружающую среду. Угольные шахты, разрезы, углеобогатительные и углебрикетные фабрики, отвалы загрязняют атмосферный воздух, водные объекты, нарушают почвенный слой земли, являются источником образования большого количества попутно добываемых твердых, жидких и газообразных отходов (см. рисунок).

Для оценки эффективности природопользования, определения затрат на проведение мероприятий по охране окружающей природной среды, обеспечения экологической безопасности необходима научно обоснованная оценка *экономического ущерба от загрязнения и истощения окружающей природной среды предприятиями угольной промышленности.*

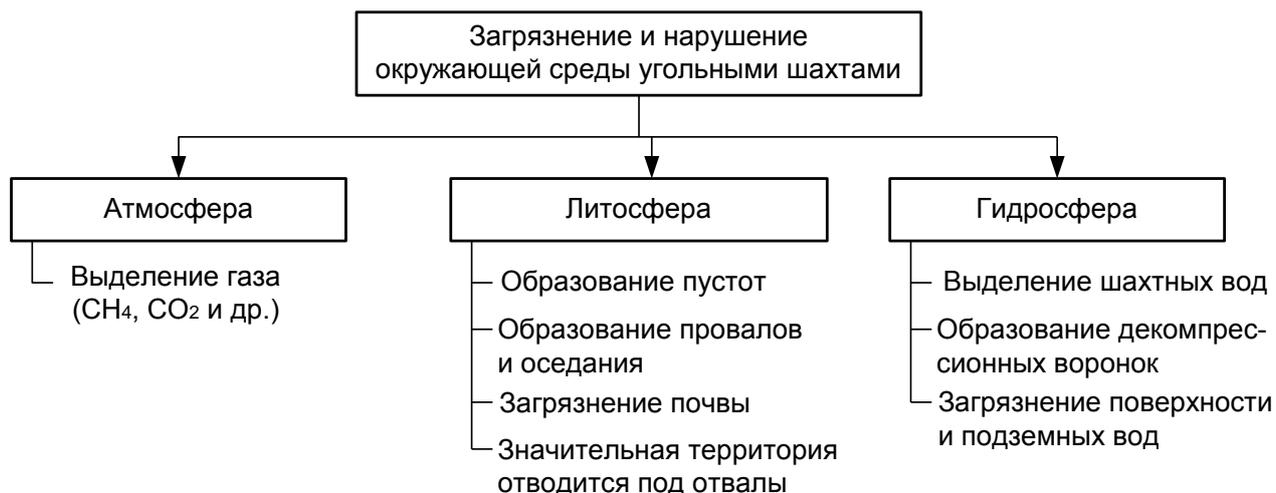


Схема загрязнения и нарушения окружающей среды угольными шахтами

**Анализ последних исследований и публикаций.** Проблеме оценки экономического ущерба от экологических нарушений посвящены исследования таких ученых, как В.К. Костенко, А.Е. Воробьев, Е.В. Рюмина, О.Ф. Балацкий, В.С. Побыванец и др.

В зарубежной экономической литературе проблема оценки ущерба от экологических нарушений разрабатывается на базе понятия «внешние эффекты» (externals). В отечественной литературе внешние эффекты стали изучаться только применительно к загрязнению окружающей среды [3].

В работе [1] рассмотрены факторы негативного влияния угольных шахт на окружающую среду. В докладе [2] определено понятие ущерба от влияния производственных процессов на окружающую среду, поставлен вопрос о необходимости изучения многих вопросов экономики природопользования в неразрывной связи с экономической теорией [3]. В статье [4] рассмотрены экономические аспекты финансирования мероприятий по борьбе с техногенными авариями. Предложены методологические подходы к формированию и реализации экологического страхования и использованию страховых фондов. Однако отсутствует механизм оценки экономического ущерба от влияния промышленного производства на окружающую природную среду. Проанализированы известные методы, которые используют при оценке экономического ущерба от экологических нарушений [5]. Обосновано, что существующие методы имеют много недостатков, поэтому требуют усовершенствования и разработки новых подходов.

**Цель исследования.** Основная цель исследования – разработка метода оценки экономического ущерба от загрязнения и истощения окружающей природной среды предприятиями угольной промышленности.

**Материалы и результаты исследования.** Под экономическим ущербом от загрязнения окружающей среды понимается материальная (денежная) оценка негативных изменений в окружающей среде в результате её загрязнения

или истощения, в качестве и количестве природных ресурсов, а также последствий этих изменений.

Основными методами расчета экономического ущерба от загрязнения окружающей среды являются:

- метод прямого счета;
- метод расчета по «монозагрязнителю»;
- метод обобщенных косвенных оценок;
- эмпирический метод.

Выбор метода зависит от цели расчета.

**Метод прямого счета** наиболее достоверный. В расчетах при этом учитывают конкретные типы и формы нарушений и загрязнений природной среды, характерные для окрестности данного предприятия в целом и по отдельным его подразделениям. Это дает возможность установить очередность природоохранных мероприятий для отдельных цехов и участков предприятия, разработать оптимальную структуру капитальных вложений на проведение мероприятий по охране окружающей природной среды.

Однако практическая реализация рассматриваемого метода затруднена, поскольку требует детальной информации о показателях, характеризующих изменение окружающей среды. При этом необходимо знать исходное состояние окружающей среды – точку отсчета, по отношению к которой констатируется изменение.

**Метод расчета по «монозагрязнителю»** используют взамен метода прямого счета. Суть метода в том, что все примеси приводятся как бы к общему знаменателю – «монозагрязнителю» с помощью специального коэффициента приведения.

Преимущество данного метода оценки ущерба от загрязнения окружающей среды – упрощенность расчетов, однако результаты оценки при этом оказываются недостаточно точными.

**Метод обобщенных косвенных оценок** положен в основу современной системы платежей за загрязнение окружающей природной среды. Этот метод более прост, чем метод прямого счета, однако более неточен. Нужно использовать нормативные показатели, что в существующих условиях нашего государства проблематично.

**Эмпирический метод** хоть и является приближенным, но более гибок, учитывает большое количество факторов и в полной мере подходит для расчета экономического ущерба от загрязнения окружающей среды предприятиями угольной промышленности.

В основу расчетов положены так называемые удельные ущербы.

Различают полный годовой экономический ущерб от загрязнения и годовой экономический ущерб от отдельного источника загрязнения. Полный годовой экономический ущерб от загрязнения окружающей среды предприятиями угольной промышленности определяют по формуле

$$Y_{\text{уг.пр}} = Y_{\text{уд}} b Q, \quad (1)$$

где  $Y_{\text{уд}}$  – удельный ущерб от загрязнения окружающей среды на 1 т выбросов, руб.;

$b$  – масса выбросов на 1 т добытого или переработанного угля, т;

$Q$  – масса добытого или переработанного угля за год, т.

Экономический ущерб от отдельного источника (угольного предприятия) рассчитывают по формуле

$$Y_{\text{ист}} = Y_{\text{атм}} \alpha + Y_{\text{в}} \beta + Y_{\text{зем}} \gamma + Y_{\text{н}} \eta + Y_{\text{отх}} \omega, \quad (2)$$

где  $Y_{\text{ист}}$  – экономический ущерб от массы всех видов выбросов, поступающих в природную среду от отдельного источника или угольного предприятия в целом в год, руб.;

$Y_{\text{атм}}$  – удельный экономический ущерб, причиняемый выбросом загрязнений в атмосферный воздух в год, руб.;

$Y_{\text{в}}$  – удельный экономический ущерб, причиняемый сбросом загрязнений в водные источники в год, руб.;

$Y_{\text{зем}}$  – удельный экономический ущерб от нарушений и загрязнения земельных ресурсов в год, руб.;

$Y_{\text{н}}$  – удельный экономический ущерб от нарушения и загрязнения недр в год, руб.;

$Y_{\text{отх}}$  – удельный экономический ущерб от размещения отходов угольной промышленности в окружающей среде в год, руб.;

$\alpha, \beta, \gamma, \eta, \omega$  – поправочные коэффициенты для степени достоверности укрупненного метода. Определяют как соотношение между показателем ущерба, определенного методом укрупненного счета, и показателем ущерба, определенного методом прямого счета.

Экономическую оценку методом укрупненного счета удельного ущерба, причиняемого выбросом загрязнений в атмосферный воздух, для любого предприятия угольной промышленности дают по формуле

$$Y_{\text{атм}} = \gamma \sigma \sum_{i=1}^n f_i m_i A_i, \quad (3)$$

где  $\gamma$  – константа, численное значение которой меняется в зависимости от роста цен за 1 т продукции, руб.;

$\sigma$  – коэффициент относительной опасности, зависящий от типа территории;

$i$  – виды вредных веществ, выбрасываемых источниками загрязнения;

$n$  – общее количество загрязнителей;

- $f_i$  – безразмерный показатель, учитывающий характер рассеяния в атмосфере  $i$ -го вида вредного вещества;  
 $m_i$  – масса выброса  $i$ -го вида вредного вещества из источника за год, т;  
 $A_i$  – показатель относительной агрессивности  $i$ -го вида вредного вещества, т.  
 Показатель относительной агрессивности определяют по формуле

$$A_i = \alpha_i \beta_i \sigma_i \lambda_i \rho_i, \quad (4)$$

- где  $\alpha_i$  – характеризует относительную опасность соединений загрязняющих веществ в воздухе, которым дышит человек;  
 $\beta_i$  – поправка, которая учитывает вероятность накопления первоначального или вторичных загрязнителей в компонентах окружающей среды, а также поступление соединения в организм человека неингаляционным путем (из справочной литературы);  
 $\sigma_i$  – поправка, которая характеризует вредное воздействие загрязняющих веществ на других реципиентов, кроме человека (из справочной литературы);  
 $\lambda_i$  – поправка на вероятность вторичного загрязнения атмосферы после их оседания на поверхностях (из справочной литературы);  
 $\rho_i$  – поправка на вероятность создания из первоначальных смесей других вторичных загрязнителей, более опасных, чем первоначальные (из справочной литературы).

Относительная опасность загрязняющих веществ в воздухе, которым дышит человек, задает уровень опасности для человека вещества  $i$ -го вида по отношению опасности оксида углерода и определяется по формуле

$$\alpha_i = \left( \frac{\text{ПДК}_{\text{СУТ}}(\text{CO}) \text{ПДК}_{\text{РС}}(\text{CO})}{\text{ПДК}_{\text{СУТ}}(i) \text{ПДК}_{\text{РС}}(i)} \right)^{0,5}, \quad (5)$$

- где  $\text{ПДК}_{\text{СУТ}}(\text{CO})$  – среднесуточная предельно допустимая концентрация загрязняющих веществ для оксида углерода, мг/м<sup>3</sup>;  
 $\text{ПДК}_{\text{РС}}(\text{CO})$  – предельно допустимое значение средней за рабочую смену концентрации загрязняющих веществ в рабочей зоне для оксида углерода, мг/м<sup>3</sup>;  
 $\text{ПДК}_{\text{СУТ}}(i)$  – среднесуточная предельно допустимая концентрация  $i$ -го загрязняющего вещества, мг/м<sup>3</sup>;  
 $\text{ПДК}_{\text{РС}}(i)$  – предельно допустимое значение средней за рабочую смену концентрации  $i$ -го из загрязняющих веществ в рабочей зоне, мг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент относительной опасности определяют по формуле

$$\sigma = \sum_{i=1}^l \frac{S_i}{S_{\text{зав}}} \delta_i, \quad (6)$$

где  $S_i$  – площадь  $i$ -й зоны активного загрязнения, м;  
 $S_{\text{заз}}$  – площадь зоны активного загрязнения, га;  
 $i$  – номер части зоны активного загрязнения, относящейся к одному из типов территорий;  
 $I$  – общее количество типов территорий, попавших в зону активного загрязнения. Промышленное загрязнение водного бассейна является результатом сбросов в водоемы сточных вод, содержащих вредные вещества (в том числе шахтный водоотлив, хвостохранилища).

Экономический ущерб от загрязнения водных ресурсов предприятиями угольной промышленности можно определить по формуле

$$Y_{\text{вод}} = Y_{ki} \delta_k \sum_{i=1}^n A_i m_i, \quad (7)$$

где  $Y_{ki}$  – удельный экономический ущерб, причиняемый сбросом 1 т примеси  $i$ -го вида в водохозяйственный участок  $k$ , руб.;

$\delta_k$  – константа для различных водохозяйственных участков (из справочника);

$A_i$  – показатель относительной опасности сброса  $i$ -го вещества в водоемы (из справочника);

$m_i$  – масса сброса  $i$ -й примеси из источника в год, т.

$$m_i = \sum q_{ij} O_j, \quad (8)$$

где  $q_{ij}$  – концентрация  $i$ -го вещества в сточных водах от источника  $j$ , г/м<sup>3</sup>;

$O_j$  – объем сброса сточных вод источником в год, тыс. м<sup>3</sup>;

$j$  – количество источников.

Показатель относительной агрессивности определяют по формуле

$$A_i = \frac{1}{\text{ПДК}_{pi/xi}}, \quad (9)$$

где  $\text{ПДК}_{pi/xi}$  – предельно допустимое значение сброса  $i$ -го вещества в водные объекты рыбохозяйственного назначения, г/м<sup>3</sup>.

Одно и то же количество вредных веществ приносит разный экономический ущерб на территории водохозяйственных объектов. Учет экологической специфики водохозяйственного участка осуществляется с помощью показателя относительной опасности загрязнения водоемов. Информация о значениях показателя – из справочной литературы.

Удельный ущерб, причиняемый хозяйству вследствие нарушения **земельных ресурсов** предприятиями угольной промышленности, определяют по формуле

$$Y_{зем} = \frac{(Y_{атм} + Y_{в} + Y_{т})S_{н}}{Q}, \quad (10)$$

где  $Y_{атм}$  – ущерб от загрязнения атмосферы из-за нарушения 1 га земель, руб.;

$Y_{в}$  – ущерб от загрязнения водоемов из-за нарушения 1 га земель, руб.;

$Y_{т}$  – ущерб от отчуждения 1 га земель, руб.;

$S_{н}$  – площадь нарушаемых земель, га;

$Q$  – стоимость выпускаемой продукции в год (переработка или добыча угля), руб.

Показатели, входящие в формулу, рассчитывают следующим образом. Ущерб от загрязнения атмосферы из-за нарушения земель определяют по формуле

$$Y_{атм} = V_a C_a k h z, \quad (11)$$

где  $V_a$  – масса пылегазообразных выбросов с 1 га земель, т;

$C_a$  – удельная оценка ущерба от выбросов в год, руб.;

$k$  – коэффициент, учитывающий зональные особенности территории;

$h$  – коэффициент, зависящий от высоты выбросов;

$z$  – коэффициент, учитывающий характер использования территории в зоне влияния нарушенных земель.

Ущерб от загрязнения водоемов из-за нарушения земель предприятиями угольной промышленности определяют по формуле

$$Y_{в} = V_{в} C_{в}, \quad (12)$$

где  $V_{в}$  – масса выносимых загрязняющих веществ в водные бассейны с загрязнителей, расположенных на 1 га земель, т;

$C_{в}$  – удельная оценка от поступления 1 т загрязняющих веществ в водоемы, руб.

Ущерб от отчуждения земель предприятиями угольной промышленности определяют по формуле

$$Y_{т} = \sum_{n=1}^N P_n (C'_n - C''_n), \quad (13)$$

где  $n$  – индекс вида сельскохозяйственной продукции;

$P_n$  – годовое количество недоданной сельскохозяйственной продукции из-за нарушения 1 га земель, т;

$C'_n$  – себестоимость 1 т  $i$ -го вида продукции, получаемой в контрольной зоне, руб.;

$C''_n$  – себестоимость 1 т  $i$ -го вида продукции, получаемой в зоне влияния нарушенных земель, руб.

Экономический ущерб от размещения в окружающей природной среде твердых промышленных отходов добычи или переработки угля определяют по формуле

$$Y_{\text{отх}} = Z_{\text{отх}} + Y_{\text{тер}} + Y_{\text{атм}}^{\text{вт}} + Y_{\text{в}}^{\text{вт}}, \quad (14)$$

где  $Z_{\text{отх}}$  – затраты на утилизацию, захоронение или уничтожение отходов в год, руб.;

$Y_{\text{тер}}$  – ущерб, причиненный хозяйству из-за выхода земель из оборота под складирование отходов, размещение свалок для захоронения отходов, породных отвалов в год, руб.;

$Y_{\text{атм}}^{\text{вт}}$  – ущерб от вторичного загрязнения атмосферы из-за размещения отходов в год, руб.;

$Y_{\text{в}}^{\text{вт}}$  – ущерб от вторичного загрязнения водоемов в год, руб.

Затраты на размещение отходов определяют по формуле

$$Z_{\text{отх}} = (Z_{\text{пр}}^{\text{т}} + Z_{\text{тр}}^{\text{т}} l + C) A_{\text{отх}}, \quad (15)$$

где  $Z_{\text{пр}}^{\text{т}}$  – затраты на погрузку и разгрузку 1 т отходов, руб.;

$Z_{\text{тр}}^{\text{т}}$  – тариф на перевозку 1 т отходов на расстояние 1 км, руб.;

$l$  – расстояние от места образования отходов до точки их ликвидации, км;

$C$  – эксплуатационные затраты, связанные с уничтожением, складированием или захоронением 1 т отходов в год, руб.;

$A_{\text{отх}}$  – масса отходов, отправляемых на складирование или захоронение в окружающей среде в год, т.

Эксплуатационные и капитальные затраты зависят от используемых методов уничтожения, изоляции и захоронения отходов. Выбор методов определяет класс опасности отходов, который устанавливают в зависимости от токсикологических характеристик входящих в состав отходов веществ.

Площадь отторгаемых земель  $S_{\text{тер}}$  определяют на основе отраслевых нормативов количества земли, выделяемой для захоронения 1 т отходов, по формуле

$$S_{\text{тер}} = S' A_{\text{отх}}, \quad (16)$$

где  $S'$  – территория земли, выделяемой для размещения 1 т отходов, га.

Экономический ущерб от отчуждения земельных угодий предприятиями угольной промышленности определяют по формуле

$$Y_{\text{тер}} = (Z_{\text{зем}} + Z_{\text{рек.зем}}) S_{\text{тер}}, \quad (17)$$

где  $Z_{\text{зем}}$  – нормативное возмещение затрат сельскохозяйственного производства в год, руб.;

$Z_{\text{рек.зем}}$  – затраты на санитарно-гигиеническую рекультивацию земель в год, руб.

Показатели  $Z_{зем}$  и  $Z_{рек.зем}$  берут из справочной литературы. Ущерб от вторичного загрязнения атмосферы и водоемов рассчитывают в соответствии с методикой, рассмотренной выше.

В некоторых случаях разрешена экономическая оценка загрязнения и отчуждения земельных ресурсов по формуле

$$Y_{отх} = qV_{почв}M, \quad (18)$$

где  $q$  – показатель, который характеризует относительную ценность земельных ресурсов;

$V_{почв}$  – убытки от выбросов загрязняющих веществ в почву (принимают равными  $V_{почв} = 2,0$  руб. – для неорганических отходов;  $V_{почв} = 3,0$  руб. – для органических отходов);

$M$  – масса выброса загрязняющих веществ в почву в год, т.

Расчеты, выполненные эмпирическим методом, показывают, что экономический ущерб, причиненный угольной промышленностью хозяйству в результате загрязнения воздушного бассейна, составляет около 60 %, водных ресурсов – около 30 % и размещение отходов и загрязнение земельных ресурсов – около 10 %.

### Выводы

1. Предприятия угольной промышленности – источники комплексного негативного воздействия на окружающую среду.

2. Проведенный анализ существующих классических методов оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды позволил выбрать наиболее приемлемый – эмпирический. На его основе разработан адаптированный метод оценки экономического ущерба от загрязнения окружающей среды предприятиями угольной промышленности.

3. Полученные зависимости учитывают не только основные затраты, вызываемые воздействием загрязненной среды, но также затраты, возникающие при вторичном загрязнении.

4. Разработанные методы оценки могут быть использованы предприятиями угольной промышленности для снижения экономических рисков и обеспечения экологической и промышленной безопасности.

### Список литературы / References

1. Исследование и оценка воздействия угольной шахты на окружающую среду / А.Е. Воробьев, В.С. Побыванец, Е.В. Чекушина, Ж.Ю. Абдулатипов, А. Роман, А.В. Синченко // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2011. – № 4. – С. 75 – 79.

Vorob'yev, A.Ye., Pobivanets, V.S., Chekushina, Ye.V., Abdulatipov, Zh.Yu., Roman, A., Sinchenko, A.V. *Issledovaniye i otsenka vozdeystviya ugol'noy shakhty*

*na okruzhayushchuyu sredu* [Investigation and estimation of the influence of a coal mine on the environment]. *Vestnik Rossiyskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernyye issledovaniya* [Bulletin of the Russian university of the people friendship. Series: Engineer investigations]. 2011, no. 4, pp. 75 – 79.

2. Рюмина, Е.В. Показатель ущерба как экономический инструмент сохранения окружающей среды / Е.В. Рюмина // Теория и практика экологического страхования: устойчивое развитие: труды VII Всероссийской конф. – М.: ИПР РАН, 2007. – С. 110 – 124.

Ryumina, Ye.V. *Pokazatel' ushcherba kak ekonomicheskij instrument sokhraneniya okruzhayushchey sredy* [The damage index as an economic instrument of the environment protection]. *Teoriya i praktika ekologicheskogo strakhovaniya: ustoychivoye razvitiye: trudy VII Vserossiyskoy konf.* [Theory and praxis of the ecological insurance: stable development: proceedings of the 7<sup>th</sup> All-Russian conference]. Moscow, IPR RAN, 2007, pp. 110 – 124.

3. Системно-экономические аспекты экологизации производства и управления предприятием: монография / С.С. Гребёнкин, В.К. Костенко, Е.С. Матлак и др.; под общей ред. С.С. Гребёнкина и В.К. Костенко. – Донецк: ВИК, 2010. – 401 с.

Grebyenkin, S.S., Kostenko, V.K., Matlak, Ye.S. etc.; Grebyenkin, S.S., Kostenko V.K., eds. *Sistemno-ekonomicheskiye aspekty ekologizatsii proizvodstva i upravleniya predpriyatiyem: monografiya* [The system-economic aspects of ecologization of the production and operation of the business: monograph]. Donetsk, VIK Publ., 2010, 401 p.

4. Кравченко, Е.В. Экономические аспекты финансирования мероприятий по борьбе с техногенными авариями / Е.В. Кравченко // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2015. – Вып. 52. – С. 41 – 50.

Kravchenko, Ye.V. *Ekonomicheskiye aspekty finansirovaniya meropriyatiy po bor'be s tekhnogennymi avariymi* [The economic aspects of financing the measures on the anthropogenic damage control]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"*: [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2015, issue 52, pp. 41 – 50.

5. Лапенко, А.А. Теоретический анализ методов оценки экономического ущерба / А.А. Лапенко // Механізм регулювання економіки: міжнар. наук. журн. – 2010. – № 2. – С. 145 – 150.

Lapenko, A.A. *Teoreticheskiy analiz metodov otsenki ekonomicheskogo ushcherba* [The theoretical analysis of methods of estimation of the economic damage]. *Mekhanizm reguliuvannia ekonomiky: mizhnar. nauk. zhurn.* – *Mechanism of regulation in the economy: the international scientific journal*, 2010, no. 2, pp. 145 – 150.

*Sergey Semyonovich Grebyonkin, Dr. Sci. (Tech.), leading scientific associate;  
e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@mail.ru);*

*Yevgeny Valentinovich Kravchenko, Cand. Sci. (Econ.), head of a postgraduate course;  
e-mail: [kravchenkoev39@mail.ru](mailto:kravchenkoev39@mail.ru);*

*Dmitry Sergeevich Buryak, scientific associate; e-mail: [buryak\\_ds@rambler.ru](mailto: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. Phones (+38 062) 311-44-92; 311-39-86*

## THE ECONOMIC DAMAGE BECAUSE OF POLLUTION OF THE ENVIRONMENT WITH COLLIERIES

**Purpose.** To work out the method of estimation of the economic damage because of pollution of the environment with the collieries.

**Methods.** Analysis of the literature sources and methods of estimation of the economic damage because of pollution and exhaustion of the natural environment.

**Results.** On the basis of the analysis of the existing classical methods of estimation of the economic damage because of pollution of the environment the most acceptable in respect to the collieries method, i.e. the empirical (aggregative) one, was chosen.

**Scientific novelty.** The adapted method of estimation of the economic damage because of pollution and exhaustion of the natural environment with the collieries was worked out.

**Practical value.** The method obtained allows carrying-out the comprehensive and sharp estimate of the economic damage because of pollution and exhaustion of the natural environment depending on conditions that are characteristic for the concrete colliery. The dependences adduced take into account not only prime costs that are stipulated by the influence of the polluted environment, but also the costs that appear by the secondary pollution.

**Keywords:** *natural environment; environmental conditions; economic damage; methods of estimation; collieries.*

**УДК 504.5:621.74**

**Михаил Витальевич Морозов**, нач. сектора; e-mail: [moroz\\_m\\_v@mail.ru](mailto:moroz_m_v@mail.ru)

Общество с ограниченной ответственностью «Научно-производственное объединение „Ясиноватский машиностроительный завод”»

286000, Ясиноватая, ул. Артема, 31. Тел. +38 071-329-36-73;

**Татьяна Федоровна Дорошенко**, канд. техн. наук, доц.; e-mail: [tatyana-f@ukr.net](mailto:tatyana-f@ukr.net);

**Анна Сергеевна Зубарева**, студент магистратуры; e-mail: [kisyuu100@mail.ru](mailto:kisyuu100@mail.ru)

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»

286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. +38 050-021-67-30

## **РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА КАК ФАКТОР СНИЖЕНИЯ НЕГАТИВНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

**Цель.** Решение проблемы рециклинга промышленных отходов машиностроения.

**Методика.** Для анализа материала шлакоотвала использовали методики: обследования действующих отвалов промышленных отходов; определения физико-химических свойств его составляющих и класса опасности.

**Результаты.** Предложения о внедрении усовершенствованной линии сортировки отходов на территории копрового цеха машиностроительного завода.

**Научная новизна.** Альтернативные направления утилизации материала шлакоотвала машиностроительного завода.

**Практическая значимость.** Приведено обоснование внедрения усовершенствованной линии сортировки отходов на территории копрового цеха машиностроительного завода.

**Ключевые слова:** рециклинг; машиностроение; окружающая среда; литейное производство; отходы; линия сортировки.

**Постановка задачи.** Угольная промышленность – основной источник получения энергоносителей на государственном уровне. Обеспечение необходимого количества добываемого угля является гарантией энергетической независимости государства. Современная горно-добывающая промышленность тесно связана с машиностроением, создающим специфические орудия труда.

Один из видов загрязнения окружающей среды Донбасса – отходы производства машиностроения, уровень использования которых очень низок. Рециклинг этих отходов имеет большое экологическое и экономическое (использование вторичных сырьевых ресурсов) значение. Актуальность исследования в том, что на машиностроительных предприятиях нашего региона имеются литейные производства с нерешенными эколого-технологическими проблемами.

Задачей литейного производства предприятий машиностроения является изготовление из металлических сплавов изделий-отливок, имеющих сложные формы и являющихся частями проходческого комбайна стреловидного типа (корпуса редукторов, звезды, скребки, ролики и т.п.). Около 85 % всего объема выпуска отливок производят в разовых песчаных формах, состоящих из двух

полуформ (верхней и нижней), которые получают уплотнением формовочной смеси вокруг соответствующих частей деревянной или металлической модели в специальных металлических рамках-опоках. Модель отличается от отливки размерами, наличием формовочных уклонов, облегчающих извлечение модели из формы, и знаковых частей, предназначенных для установки стержня, образующего внутреннее отверстие в отливке. Стержень изготавливают из специальной песчаной смеси. Для изготовления формообразующих частей литейной формы применяют в основном песчано-смоляные смеси с использованием органического связующего. При этом используют дорогостоящие смоляные связующие, отвердители, а также различные добавки, улучшающие свойства смесей. Изготовление литых деталей таким методом связано с образованием твердых нерегенерируемых отходов.

В процессе литейного производства в машиностроении образуется большое количество различных отходов (на 1 т отливок 1...3 т отходов): литейные шлаки, жидкое стекло, бой шамотного кирпича, отработанные формовочная и стержневая смеси, мелкий скрап, металлические отходы, промышленные отходы (табл. 1). Эти отходы вывозят железнодорожным (или автомобильным) транспортом и складывают на шлакоотвалах на участке копрового цеха завода. Материал шлакоотвала можно отнести к отходам 4-го (15,88 %) и 5-го классов (84,12 %) опасности.

Таблица 1

## Формирующие шлакоотвал отходы

Наименование	Класс опасности	Лимит в год, т
Отходы песка и пескоструйных устройств	4	834,2
Отходы абразивных материалов (пыль и порошок)	4	26,5
Шлак сварочный	4	1,3
Металлическая дробь с примесью шлаковой корки	4	96,0
Скрап чугуна незагрязненный	4	2137,5
Скрап стальной незагрязненный	4	4673,9
Скрап алюминиевый незагрязненный	5	1,1
Скрап бронзы и медных сплавов незагрязненный	5	1,2
Скрап латуни незагрязненный	5	1,1
Отработанные формовочные и стержневые смеси	5	41163,0

Под воздействием природных факторов (атмосферных осадков, солнечного тепла) из отвалов выщелачиваются вредные химические вещества, которые загрязняют почву, грунтовые и подземные воды, окружающую отвал местность. Однако малая концентрация токсичных веществ и быстрое их разложение под воздействием микроорганизмов снижают опасность

загрязнения окружающей среды. Поэтому наличие в литейном производстве значительного количества твердых отходов в виде отработанной формовочной смеси делает первоочередной задачей их регенерации с целью возврата в производство, а также утилизации нерегенерируемых остатков.

**Анализ последних исследований.** Согласно статьям [1-3], утилизация отработанных смесей не находит широкого применения в литейном производстве и твердые отходы вывозят на отвалы, загрязняя окружающую среду. Полностью устранить эти отвалы сложно, но снизить их количество, развивая прогрессивные формы литья, безотходные или малоотходные технологии, возможно. Серией работ [3-6], связанных с изучением состава и путей комплексной переработки компонентов отработанных смесей литейного производства, показана перспективность сортировки компонентов таких смесей.

Обзор литературных источников показал, что существует множество способов утилизации стержневых смесей, в то же время проблема не решена.

**Материалы и результаты исследований.** Проведены исследования возможности переработки материала шлакоотвала литейного производства, в частности отработанных формовочных и стержневых смесей (табл. 2), с целью извлечения из них металлических отходов, песка и щебня для дальнейшего использования.

Результаты предварительных исследований отходов: материал серого цвета со специфическим запахом, плотность  $1,52 \text{ кг/м}^3$ , влажность 7,46 %, рН среды 7,09.

Таблица 2

Результаты химического анализа материала шлакоотвала

Компонент	Массовая доля компонента, %
Нефтепродукты	1,32
Железо	92,30
Кремний	6,01
Хром	0,18
Медь	0,06
Алюминий	0,01
Цинк	0,01
Никель	0,11

Отбор проб отходов литейного производства проводили по методике обследования действующих отвалов промышленных отходов (ГОСТ 17.4.3.01-83, СТ СЭВ 3847-82) при общих и локальных загрязнениях дифференциальным (на каждом участке технологической цепи) и интегральным (с отвала) методами.

Основу формовочных смесей составляет песчаная смесь. В качестве отвердителей применяют: фенолформальдегидные смолы (СФ-015, ФПР-24), карбидофурановые смолы (КФ-90, КФ-40), крахмалит, бентонит, стеарат кальция (цинка), тяжелую фракцию сланцевой смолы, жидкое стекло (силикат натрия, алюминат натрия), соли (сульфаты, фториды, хлориды), фосфатные композиции (смесь оксидов железа, оксидов магния и хрома). В качестве катализаторов используют: ортофосфорную кислоту, мочевины, медь азотнокислую, уротропин, каучук.

Учитывая относительную безопасность отходов литейного производства для окружающей природной среды, определенную на основании совокупности результатов количественных физико-химических исследований, считаем возможной утилизацию материала шлакоотвала в следующем альтернативном качестве:

- доступный, дешевый и безопасный в обращении материал для планировки местности и проведения дорожно-строительных работ (при ремонте и укладке твердых покрытий, закладке фундаментов, засыпке ям, канав, оврагов и выработанных карьеров), причем можно использовать индивидуально или в комбинации с песком, гравием, щебнем и т.д.;
- добавка в сырье для производства вяжущих и строительных материалов, низкомарочных сортов цемента, бетона, кирпича, шлакоблоков;
- нетоксичный инертный материал для засыпки на полигонах твердых бытовых отходов.

Полностью устранить отвалы литейного производства – задача довольно трудная, но снизить их количество и сделать их безвредными для природы возможно, создавая безотходные или малоотходные технологии.

Для соблюдения требований экологической безопасности и минимизации негативного воздействия материалов шлакоотвала на окружающую среду предложено внедрить усовершенствованную линию сортировки отходов непосредственно на территории копрового цеха (см. рисунок).

Линия сортировки может состоять из следующих частей:

- питателя пластинчатого передвижного, предназначенного для равномерной подачи материала в дробилку. Выбор питателя обусловлен возможностью встраиваться в автоматизированные линии;
- магнитного сепаратора, предназначенного для удаления ферромагнитных и слабомагнитных (процесс обогащения) металлических частиц из потока сепарируемого материала в сухой среде. В основе работы магнитного сепаратора – принцип разделения сепарируемого продукта по магнитным свойствам с помощью магнитного барабана в секторном исполнении. Магнитная система, состоящая из постоянных магнитов, закреплена по диаметру барабана (под углом  $180^\circ$ ), который крепят неподвижно на раме. Внешний барабан большего диаметра – обечайка, изготовленный из нержавеющей стали, приводится во вращение с помощью мотора-редуктора. Обработываемый материал через направляющий лоток из нержавеющей стали

подаётся непосредственно на вращающийся барабан. Попадая в зону действия мощного магнитного поля, ферромагнитные частицы притягиваются к поверхности барабана и удерживаются до момента прохождения обечайкой магнитного сектора, в результате чего удерживаемые ферромагнитные частицы выводятся из зоны действия магнитного поля и оседают под собственным весом, а немагнитный продукт продолжает движение по естественной траектории;

- агрегата промежуточной сортировки, состоящего из грохота, рамы, двух опор, бункера и двух площадок. Этот агрегат необходим для предварительного и промежуточного грохочения каменных материалов, гравийной массы, литейных шлаков и других крупнокусковых материалов с размером куска до 1 м;

- специальных конвейеров (ширина ленты 600 и 800 мм), предназначенных для транспортирования соответственно сыпучих и мелкокусковых материалов и применяемых для комплектования технологических линий дробильно-сортировочных установок.

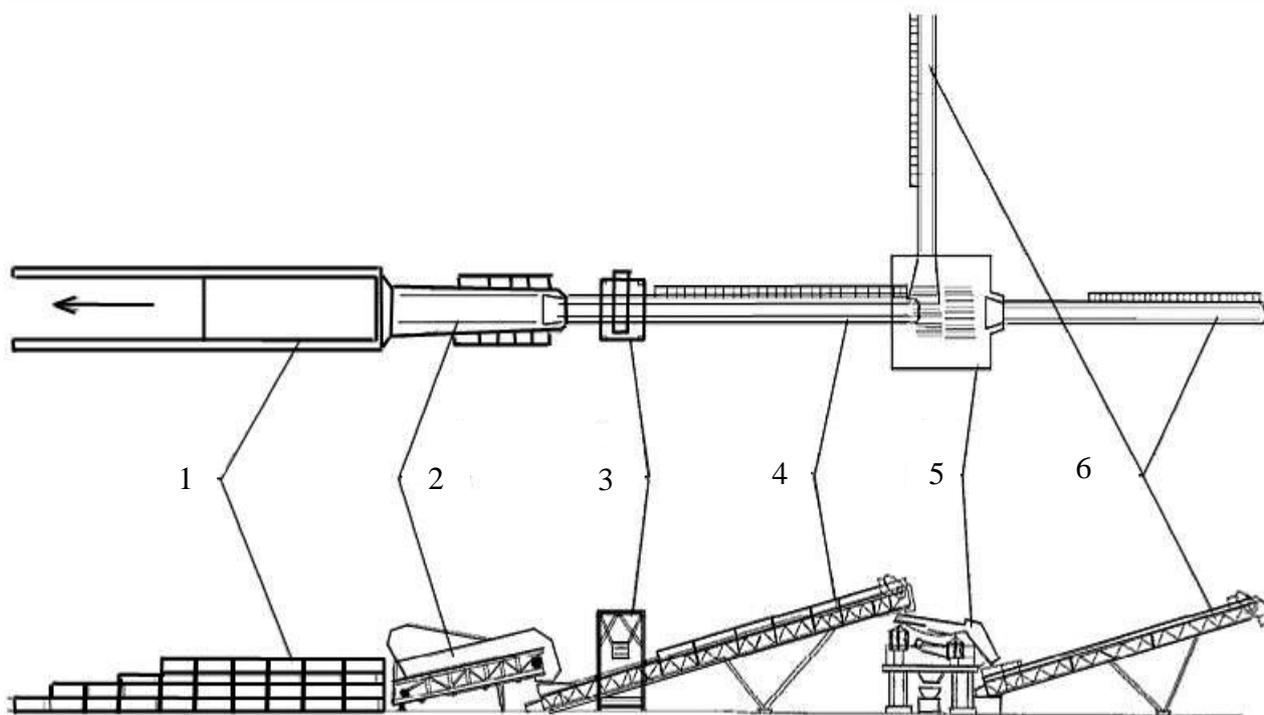


Схема усовершенствованной линии сортировки отходов  
на шлакоотвале:

1 — эстакада для загрузки транспортом; 2 — питатель пластинчатый передвижной; 3 — железотделитель подвесной саморазгружающийся; 4 — конвейер с лентой шириной 800 мм; 5 — агрегат промежуточной сортировки; 6 — конвейер с лентой шириной 600 мм

Принцип действия предлагаемой усовершенствованной линии сортировки можно представить следующей схемой: материал шлакоотвала → → автотранспорт → установка → засыпной бункер → конвейерная лента → → магнитный сепаратор барабанного типа → отделение металла → смесь (песок + камень) → конвейерная лента → грохот → отделение крупной фракции от мелкой.

Основной тенденцией уменьшения количества твердых отходов на шлакоотвалах следует считать регенерацию отработанных песков литейного производства, что обеспечивает снижение расхода свежих песков, а также связующих и катализаторов. В зависимости от вида металла, толщины и массы стенок отливок в состав формовочных смесей входят в определенной пропорции неорганические (кварцевый песок, огнеупорная глина) и органические (опилки, каменноугольная пыль) материалы. Регенерация горелой земли, образовавшейся после отливки изделий, состоит в удалении пыли, мелких фракций и глины, потерявшей связующие свойства под влиянием высокой температуры при заполнении формы металлом.

В условиях машиностроительного завода отходам, не подлежащим регенерации, найдено рациональное ресурсосберегающее применение (табл. 3).

Таблица 3

#### Утилизация формирующих шлакоотвал отходов

Отходы	Вид материала	Область использования
Литейные шлаки	Шлаковый щебень	Заменяет гранитный щебень
	Шлакоцементное вяжущее I	Сырьевой компонент в производстве клинкера
	Шлакоцементное вяжущее II	Минеральная добавка в вяжущее
Отработанные формовочные и стержневые смеси	Безклинкерное шлаковое вяжущее	В производстве керамических изделий из тугоплавких глин
	Компонент сырьевой смеси	Отсыпка автомобильных дорог

Для получения дополнительной прибыли на машиностроительном заводе предлагается: продавать сторонним организациям песок и щебень, полученные в результате сортировки отработанной формовочной и стержневой смеси на усовершенствованной линии; возвращать металл в собственное производство для снижения затрат на закупку сырья.

**Выводы.** Альтернативные направления утилизации материала шлакоотвала расширят возможности использования отходов. Внедрение

усовершенствованной линии сортировки отходов на территории копрового цеха позволит решить вопросы рециклинга отходов машиностроения.

#### Список литературы / References

1. Илларионов, И.Е. О применении техногенных отходов в литейном производстве / И.Е. Илларионов, И.А. Стрельников // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2016. – Т. 14, № 4. – С. 36 – 41.

Illarionov, I.Ye., Strel'nikov, I.A. *O primeneniі tekhnogennykh otkhodov v liteynom proizvodstve* [About application of the anthropogenic waste products in the foundry]. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova* [Bulletin of the G.I. Nosov MGTU]. 2016, vol. 14, no. 4, pp. 36 – 41.

2. Исследование возможности регенерации формовочных песков из отвалных смесей литейного производства и использования отходов регенерации / Д.М. Кукуй, В.Ф. Одиночко, И.В. Кирилов, А.В. Бусел, В.В. Воробьев // Литье и металлургия. – 2009. – № 3(52). – С.33 – 36.

Kukuy, D.M., Odinochko, V.F., Kirilov, I.V., Busel, A.V., Vorob'yev, V.V. *Issledovaniye vozmozhnosti regeneratsii formovochnykh peskov iz otvalnykh smesey liteynogo proizvodstva i ispol'zovaniya otkhodov regeneratsii* [Investigation of possibility of the regeneration of the molding sands from the waste mixtures of the foundry and of the use of the regeneration waste products]. *Lit'ye i metallurgiya – Foundry and metallurgy*, 2009, no. 3(52), pp. 33-36.

3. Шалевская, И.А. Исследование возможности утилизации отходов формовочных смесей / И.А. Шалевская, Ю.И. Гутько // Вісник Донбаської державної машинобудівної академії. – 2011. – № 4 (25). – С.169 – 173.

Shalevskaya, I.A., Gut'ko, Yu.I. *Issledovaniye vozmozhnosti utilizatsii otkhodov formovochnykh smesey* [Investigation of possibility of recycling of the molding sand wastes]. *Visnyk Donbas'koi derzhavnoi mashynobudivnoi akademii* [Bulletin of the Donbas State Engineering Academy]. 2011, no. 4(25), pp.169-173.

4. Голотенков, О.Н. Формовочные материалы / О.Н. Голотенков. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 164 с.

Golotenkov, O.N. *Formovochnyye materialy* [Molding materials]. Penza, Penz. gos. un-ta Publ., 2004, 164 p.

5. Кривицкий, В.С. Экологические проблемы литейного производства и пути их развития [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ci.crtm.ru/examples/my-components/news/329/> (дата обращения: 18.02.2017).

Krivitskiy, V.S. *Ekologicheskiye problemy liteynogo proizvodstva i puti ikh razvitiya* [Ecological problems of the foundry and ways of its development] (Electronic resource). Available at: <http://ci.crtm.ru/examples/my-components/news/329/> (accessed 18.02.2017).

6. Жуковский, С.С. Холоднотвердеющие связующие и смеси для литейных стержней и форм: справочник / С.С. Жуковский. – М.: Машиностроение, 2010. – 256 с.

Zhukovskiy, S.S. *Kholodnotverdeyushchiye svyazuyushchiye i smesi dlya liteynykh sterzhney i form: handbook* [Cold-hardening binders and mixtures for mold cores and forms: handbook]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2010, 256 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.  
Дата поступления рукописи 14.03.2017

**Mikhail Vitalyevich Morozov**, manager of sector; e-mail: [moroz\\_m\\_v@mail.ru](mailto:moroz_m_v@mail.ru)

The Scientific and production amalgamation "Yasinovatskiy Machine Building Plant" Co., Ltd  
286000, Yasinovataya, 31, ulitsa Artyoma. Phone +38 071-329-36-73;

**Tatyana Fyodorovna Doroshenko**, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: [tatyana-f@ukr.net](mailto:tatyana-f@ukr.net);

**Anna Sergeevna Zubareva**, postgraduate student; e-mail: [kisynu100@mail.ru](mailto:kisynu100@mail.ru)

The State Educational Institution of Higher Occupational Education "The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture"

286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone +38 050-021-67-30

## RECYCLING THE PRODUCTION WASTE AS A FACTOR OF DECREASE OF THE NEGATIVE INFLUENCE ON THE ENVIRONMENT

**Purpose.** Solving the problem of recycling the industrial waste of the mechanical engineering.

**Methods.** To analyze the material of the slag-dump the methods of investigation of the active industrial waste dumps, of determination of the physical and chemical properties of its components and of the danger class were used.

**Results.** Proposals concerning the improved waste assorting line in the territory of the drop-hammer shop of the machine building plant.

**Scientific novelty.** Alternative directions of recycling the material of the slag-dump of the machine building plant.

**Practical value.** The substantiation of introduction of the improved waste assorting line in the territory of the drop-hammer shop of the machine building plant is adduced.

**Keywords:** *recycling; mechanical engineering; environment; foundry engineering; waste; assorting line.*

**УДК 622.87:331.46**

**Вадим Леонидович Овчаренко**, канд. техн. наук, доц.; e-mail: [ovcharenko.vad@yandex.ru](mailto:ovcharenko.vad@yandex.ru)  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (ДонНТУ)

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. +38 095 525-06-16;

**Олег Григорьевич Кременев**, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: [maknii.niot@mail.ru](mailto:maknii.niot@mail.ru)  
ГУ «Макеевский научно-исследовательский институт по безопасности работ в горной промышленности» (МакНИИ)

286132, Макеевка, ул. Лихачева, 60. Тел. +38 095 847-61-35

## **РЕТРОСПЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ РИСКА ПОДЗЕМНЫХ ГОРНОРАБОЧИХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ ДОНБАССА**

**Цель.** Ретроспективный анализ риска подземных горнорабочих угольных шахт для разработки мер по повышению эффективности управления им.

**Методика.** Аналитические исследования динамики риска подземных горнорабочих угольной промышленности Донбасса по литературным источникам с использованием расчётов риска по реальным данным травматизма с ретроспективой (1958...2013 гг.).

**Результаты.** Ретроспективно исследована зависимость динамики показателей риска травматизма со смертельным исходом подземных горнорабочих угольных шахт Донбасса от наличия опасных и вредных производственных факторов на рабочих местах, динамики угледобычи и численности персонала, разработаны рекомендации по его снижению.

**Научная новизна.** Установлен критерий технически достижимого уровня риска безопасности основных технологических процессов угледобычи, принятый в качестве исходного показателя риска при разработке мер его оптимизации.

**Практическая значимость.** Полученные результаты могут быть использованы при разработке эффективных мер по снижению риска подземных горнорабочих угольных шахт Донбасса.

**Ключевые слова:** *риск; управление риском; уровень профессионального риска; добыча угля; критерий; подземный горнорабочий; горные и горно-восстановительные работы; угольная шахта.*

**Постановка проблемы.** Управление профессиональным риском подземных горнорабочих угольных шахт Донбасса – одна из актуальных проблем охраны труда и безопасности ведения горных работ. Угольная шахта является уникальным и сложным производством с особо опасными условиями, с непредвиденными и внезапными изменениями действующих природных сил [1, с. 3, 36, 39]. Неправильные действия одного работника могут привести к многочисленным человеческим жертвам и нанести серьёзный ущерб окружающей среде. В связи с этим законодательство Донецкой Народной Республики обязывает собственников шахт, владельцев, директоров горных предприятий при приёме на работу в шахту ставить в известность будущего работника о наличии опасных и вредных производственных факторов на рабочем месте [2, с. 12]. Действие этих факторов на работающих определяет уровень опасности рабочего места и степень профессионального риска работника.

**Анализ последних исследований.** По международной договорённости принято считать, что при действии техногенных опасностей техногенный риск должен находиться в пределах от  $10^{-7}$  до  $10^{-6}$  (количество смертельных случаев в год). При этом показатель  $10^{-6}$  является максимально приемлемым для уровня

индивидуального риска (гибель одного человека на 1,0 млн чел. в год) [3, с. 59-61]. При исследовании риска подземных горнорабочих угольных шахт Донбасса [4, с. 16-18; 5, с. 35-38] получены показатели риска для ряда основных профессий, поднят вопрос о необходимости решения проблемы профессионального риска шахтёров в дальнейших исследованиях.

**Цель исследования.** Ретроспективный анализ риска подземных горнорабочих угольных шахт для разработки мер по повышению эффективности управления им.

**Результаты исследований.** Для реализации поставленной цели решены следующие задачи:

- обоснована необходимость повышения эффективности управления профессиональным риском подземных горнорабочих угольных предприятий;
- выполнен расчет средних значений риска как критерия оценки технически достижимого уровня безопасности основных технологических процессов в угольной промышленности Донбасса;
- проанализированы показатели профессионального риска подземных горнорабочих угольных шахт за 1958...2013 гг. и установлено наличие связи между показателями профессионального риска, численностью подземных горнорабочих с динамикой угледобычи и эффективностью мер, применяемых производственными службами угольных шахт для снижения показателей профессионального риска;
- предложены решения по снижению риска подземных горнорабочих угольных шахт.

Для оценки эффективности управления профессиональным риском в угольной промышленности был проведен анализ динамики показателя риска травматизма подземных горнорабочих со смертельным исходом по годам как показателя, наименее подверженного конъюнктурным влияниям и временным тенденциям по сравнению с показателями других видов травматизма.

Анализ показателей профессионального риска проведен с ретроспекцией 55 лет (1958...2013 гг.) в сопоставлении с динамикой численности подземных горнорабочих и угледобычи по 10 временным интервалам, характеризующимся подъёмами, стабилизацией и падениями показателей угледобычи. Расчёт средних значений риска, угледобычи и численности подземных горнорабочих угольной промышленности по каждому периоду производился с использованием фактических данных их травматизма [5, с. 35-38]. Результаты расчётов приведены в табл. 1.

Расчёты средних показателей уровней профессионального риска подземных горнорабочих по периодам и отклонений их от средних значений производились с вероятностью 0,95 [4, с. 16-18; 5, с. 35-38].

По данным показателей профессионального риска, приведенным в табл. 1, рассчитан показатель технически достижимого риска для подземных горнорабочих, принятый в качестве критерия оценки риска и исходного уровня риска при разработке мероприятий по его оптимизации. Он равен среднему значению риска  $m_{кр}$ , рассчитанному за 55 лет с учётом 10 временных интервалов,  $m_{кр} = 0,6717 \cdot 10^{-3}$  со стандартной ошибкой средней арифметической, равной  $e_{кр} = 0,091 \cdot 10^{-3}$ .

Таблица 1

Динамика изменения показателей численности подземных горнорабочих, добычи угля и профессионального риска во временных интервалах за 1958...2013 гг.

№ п/п временного интервала (периода)	Временной интервал (период), год	Численность подземных горнорабочих, тыс. чел.	Добыча угля, млн тонн/год	Показатель профессионального риска* $10^{-3}$ , год <sup>-1</sup>
I	1958...1967	784,9...718,1	164,2...199,0	1,41...0,69 (1,05)
II	1967...1976	718,1...662,0	199,0...217,1	0,69...0,56 (0,63)
III	1976...1980	662,0...704,7	217,1...197,1	0,56...0,64 (0,60)
IV	1980...1988	704,7...762,8	197,1...191,9	0,64...0,40 (0,52)
V	1988...1991	762,8...717,3	191,9...135,1	0,40...0,42 (0,41)
VI	1991...1996	717,3...461,9	135,1...71,7	0,42...0,56 (0,49)
VII	1996...2000	461,9...374,1	71,7...80,3	0,74...0,82 (0,78)
VIII	2000...2004	374,1...304,3	80,3...80,3	0,82...0,66 (0,74)
IX	2004...2009	304,3...227,0	80,3...72,2	0,66...0,67 (0,665)
X	2009...2013	227,0...164,6	72,2...83,6	0,67...0,93 (0,80)

\* В скобках указано среднее значение показателя профессионального риска в соответствующем временном периоде.

Незначительное снижение риска в I...VI периодах произошло вследствие внедрения механизированных комплексов для добычи угля и ведения подготовительных работ [6, с. 11]. На угольных пластах пологого падения доля комплексно-механизированных забоев от общего их количества составила 63 %, из которых до 20 % постоянно находились в монтаже-демонтаже, из них до 79 % действующих комплексно-механизированных очистных забоев оснащены устаревшими механизированными крепями, а в 95 % из них применяли морально устаревшие очистные комбайны и забойные скребковые конвейеры, темпы технического перевооружения лав характеризовались низкими показателями (3...5 %), а к 2013 г. практически были сведены к нулю. На угольных пластах крутого падения внедрение комбайновой и щитовой выемки составляет 25...30 %. Уменьшение численности подземных горнорабочих существенно не отразилось на показателе риска [5, с. 37-38]. Во втором периоде добыча угля возросла и достигла максимального значения в 1976 г. 217,1 млн тонн при незначительном снижении численности подземных горнорабочих. В третьем периоде добыча угля снизилась до 191,9 млн тонн при увеличении численности подземных горнорабочих на 6,5 %. В четвёртом периоде добыча угля снизилась на 2,6 %, а численность подземных горнорабочих увеличилась

на 8,2 %. В пятом периоде численность подземных горнорабочих уменьшилась на 6,0 %, добыча уменьшилась на 29,6 % (со 191,9 млн тонн до 135,1 млн тонн). Темпы снижения добычи угля оказались несоизмеримыми со снижением уровня показателя риска. В шестом периоде резко снизилась добыча угля со 135,1 млн тонн до 71,6 млн тонн (на 47 %), а численность подземных горнорабочих уменьшилась на 35,6 % (с 717,3 тыс. чел. до 461,9 тыс. чел.).

Интенсивность труда на угольных предприятиях по показателям угледобычи в I...VI периодах снизилась до предельно низкого уровня, при котором она перестала оказывать существенное влияние на травматизм. До минимума были сокращены дотации шахтам Донбасса на внедрение безопасных технологий горного производства и охрану труда. В VII...X периодах (1996...2013 гг.) в добыче угля наметился некоторый подъём (с 71,7 млн тонн до 83,6 млн тонн) за счёт более рационального использования высокопроизводительной техники угледобычи (очистные забои с добычей более 1000 т/сут). Численность подземных горнорабочих в этом периоде продолжала уменьшаться и к 2013 г. была 164,6 тыс. чел. В 2013 г. показатель риска травматизма со смертельным исходом вырос до  $0,93 \cdot 10^{-3}$ . Это повышение было связано с массовым оттоком квалифицированных рабочих кадров из угольной промышленности и приходом молодых, неопытных работников.

Значительный вклад в риск травматизма со смертельным исходом вносят техногенные аварии (вспышки, взрывы метана, угольной пыли и др.), причинами которых в подавляющем большинстве случаев являются нарушения технологической дисциплины при ведении горных работ.

Анализ динамики показателей профессионального риска, приведенных в табл. 1, свидетельствует о стабильности его численного значения на протяжении 5,5 десятков лет с незначительным варьированием в пределах стандартной ошибки ( $\pm 0,091 \cdot 10^{-3}$ ). Из проведенного анализа следует вывод о том, что наработанные годами приёмы, методы и способы управления риском исчерпали свои возможности. Это вызывает необходимость принятия мер к внедрению новых прогрессивных решений для снижения риска.

На динамику численности подземных горнорабочих за 1991...2013 гг. оказали существенное влияние периодически проводимые реорганизации структур управления отрасли. Для анализа использовали усреднённые показатели численности подземных горнорабочих шахт по видам выполняемых работ, рассчитанные с учётом рекомендуемых процентных соотношений [7, с. 273-279] (табл. 2).

Насколько остро стоит проблема управления профессиональным риском в угольной промышленности, видно из результатов расчёта усреднённых показателей риска травматизма со смертельным исходом горнорабочих основных профессий угольных шахт (табл. 3).

Таблица 2

Численность подземных горнорабочих в 1991 и 2013 гг. в зависимости от видов выполняемых работ на угольных шахтах

Вид работ	Показатели численности подземных горнорабочих, тыс. чел.	
	1991 г.	2013 г.
Все работы	717,6	164,6
Подземные работы	509,5	117,0
Очистные работы	150,6	34,6
Подготовительные работы	129,2	29,6
На подземном транспорте и подъёме	86,1	19,8
Содержание и ремонт горных выработок и откаточных путей	28,7	6,6
Обслуживание и ремонт общешахтных механизмов и стационарных установок	71,8	16,5
Прочие работы	43,1	9,9
Занято на поверхности шахт	208,1	47,7

Таблица 3

Показатели риска травматизма со смертельным исходом рабочих основных профессий угольных шахт за 1994...2013 гг.

Профессия и должность	Уровень профессионального риска травматизма со смертельным исходом $10^{-3}$ , год <sup>-1</sup>					Разность между показателями риска за (1994...1996)...2013 гг.
	1994	1995	1996	Средний риск	2013	
Забойщик	2,46	2,29	1,15	1,95	0,80	+1,15
Машинист горно-выемочных машин	1,37	1,17	1,06	1,20	1,20	0,00
ГРОЗ	1,30	0,88	1,25	1,14	0,69	+0,45
Проходчик	1,36	1,15	0,89	1,13	0,48	+0,65
Электрослесарь	0,94	0,68	0,76	0,79	0,77	+0,02
Прочие подземные горнорабочие	0,76	0,55	0,78	0,70	1,08	-0,38
Мастера-взрывники	0,78	0,16	0,47	0,47	0,44	+0,03
Все профессии и ИТР	1,00	0,72	0,79	0,84	0,91	-0,07
Все профессии и ИТР (поверхность)	0,26	0,34	0,25	0,28	0,25	+0,03

Анализ показателей численности подземных горнорабочих в 1994...1996 гг. и 2013 г. и показателей риска травматизма со смертельным исходом рабочих основных профессий угольных шахт позволил установить, что с 1994 по 2013 г.: общая численность подземных горнорабочих уменьшилась в 4,36 раза; на

подземных и очистных работах – в 4,35 раза; в это же время риск забойщиков на крутых пластах уменьшился на  $1,15 \cdot 10^{-3}$  (в 2,44 раза), машинистов горно-выемочных машин – остался неизменным, ГРОЗ – уменьшился на  $0,45 \cdot 10^{-3}$  (в 1,65 раза), проходчиков – уменьшился на  $0,65 \cdot 10^{-3}$  (в 2,35 раза), электрослесарей, мастеров-взрывников, рабочих поверхности – практически остался на том же уровне; вырос показатель риска прочих подземных горнорабочих на  $0,38 \cdot 10^{-3}$  (в 1,54 раза) и в среднем всех профессий и ИТР на  $0,07 \cdot 10^{-3}$  (в 1,08 раза).

Уменьшение риска основных профессий подземных горнорабочих (забойщиков, ГРОЗ, проходчиков) осуществлялось за счёт: внедрения в очистных забоях механизированных комплексов, в подготовительных забоях – высокопроизводительных комбайнов избирательного действия с дистанционным управлением; закрытия нерентабельных горных производств с повышенным уровнем риска; увеличения финансовых вложений в развитие более выгодных направлений горных работ.

По данным МакНИИ, в 2012 г. весомоть фактора «обрушение» (проходчики, забойщики, ГРОЗ) в травмировании со смертельным исходом составила 0,229, а в IX и X периодах (см. табл. 1) этот показатель снизился в среднем в 2 раза, при этом риск подземных горнорабочих более низких разрядов вырос почти в 1,5 раза. Увеличение риска этой категории горнорабочих связано с использованием ручного труда при выполнении производственных операций при практическом отсутствии малой механизации, ухудшением состояния горных выработок (несоответствие сечений выработок проектным, нарушения затяжки кровли, обводнённости и др.), и в результате роста количества обрушений на протяжении выработок. В риске содержится немалая доля недостаточно осознанного стремления к нарушению установленных Правил безопасности в угольных шахтах.

**Выводы.** Обоснована необходимость поиска новых решений в управлении риском подземных горнорабочих угольных шахт. Обоснован и определён показатель технически достижимого уровня профессионального риска подземных горнорабочих угольных шахт, принятый в качестве критерия оценки риска и исходного уровня риска при разработке мероприятий по его оптимизации. Установлено наличие связи показателей профессионального риска подземных горнорабочих с динамикой угледобычи, численностью персонала и эффективностью мер по снижению риска; причины высокого риска травматизма со смертельным исходом связаны с нарушениями требований техногенной и технологической безопасности ведения горных работ; повышенному риску подземных горнорабочих в 1996...2013 гг. способствуют упущения в развитии и использовании малой механизации при выполнении трудоёмких горных работ вручную, а также человеческий фактор.

Для уменьшения риска основных профессий подземных горнорабочих (забойщиков, ГРОЗ, проходчиков) необходимо повсеместное внедрение в практику угледобычи механизированных комплексов, в подготовительных забоях – комбайнов избирательного действия, разработка и широкое внедрение малой

механизации при выполнении вспомогательных работ, повышение уровня технологической и производственной дисциплины.

### Список литературы / References

1. Донецкая Народная Республика. Законы. О промышленной безопасности опасных производственных объектов [Текст]: [принят Народным Советом ДНР 05 июня 2015 г.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dnrsovet.su/zakon-dnr-o-promyshlennoj-bezopasnosti-opasnyh-proizvodstvennyh-obektov> (дата обращения: 01.10.2016).

*Donetskaya Narodnaya Respublika. Zakony. O promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob'yektov [Tekst]: [prinyat Narodnym Sovetom DNR 05 iyunya 2015 g.] [The Donetsk People's Republic. Laws. About the industrial safety of the hazardous manufacturing entities [Text]: [passed by the People's Soviet of the Donetsk People's Republic on the 05<sup>th</sup> June, 2015] [Electronic resource]. – Available at: <http://dnrsovet.su/zakon-dnr-o-promyshlennoj-bezopasnosti-opasnyh-proizvodstvennyh-obektov> (accessed 01.10.2016).*

2. Донецкая Народная Республика. Законы. Об охране труда [Текст]: [принят Народным Советом ДНР 03 апреля 2015 г.] [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dnrsovet.su/zakon-dnr-ob-okhrane-truda> (дата обращения: 01.10.2016).

*Donetskaya Narodnaya Respublika. Zakony. Ob okhrane truda [Tekst]: [prinyat Narodnym Sovetom DNR 03 aprelya 2015 g.] [The Donetsk People's Republic. Laws. About labor protection] [Text]: [passed by the People's Soviet of the Donetsk People's Republic on the 03<sup>rd</sup> April, 2015] [Electronic resource]. – Available at: <http://dnrsovet.su/zakon-dnr-ob-okhrane-truda> (accessed 01.10.2016).*

3. Надёжность технических систем и техногенный риск / В.А. Акимов, В.Л. Лапин, В.М. Попов, В.А. Пучков, В.И. Томаков, М.И. Фалеев. – М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. – 368 с.

Akimov, V.A., Lapin, V.L., Popov, V.M., Puchkov, V.A., Tomakov, V.I., Faleyev, M.I. *Nadyezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyu risk* [Reliability of technical systems and anthropogenic risk]. Moscow, ZAO FID "Delovoy ekspress" Publ., 2002, 368 p.

4. Овчаренко, В.Л. О проблеме управления профессиональным риском в угольной промышленности [Текст] / В.Л. Овчаренко, П.К. Кучеба // Охрана труда. – 1998. – № 4. – С. 16 – 18.

Ovcharenko, V.L., Kucheba, P.K. *O probleme upravleniya professional'nyu riskom v ugol'noy promyshlennosti* [Text] [About the problem of the professional risk management in the coal industry] [Text]. *Okhrana truda – Labor protection*, 1998, no. 4, pp. 16 – 18.

5. Ященко, И.А. Некоторые итоги по охране и безопасности труда на предприятиях угольной промышленности Украины в 2003 году [Текст] / И.А. Ященко // Чистый четверг. – 2004. – № 4. – С. 35 – 38.

Yashchenko, I.A. *Nekotoryye itogi po okhrane i bezopasnosti truda na predpriyatiyakh ugol'noy promyshlennosti Ukrainy v 2003 godu* [Text] [Some

results on labor protection and labor safety at collieries of the Ukraine in the year 2003 [Text]. *Chistyuy chetverg – The Great Thursday*, 2004, no. 4, pp. 35 – 38.

6. Основы создания и эффективной эксплуатации систем жизнеобеспечения очистного оборудования для угольных шахт: [моногр.] / [С.С. Гребёнкин, В.В. Косарев, С.Е. Топчий, Н.И. Стадник, В.И. Зензеров, В.В. Стеблин, Б.А. Перепелица, В.Н. Поповский]; под общей ред. С.С. Гребёнкина и В.В. Косарева. – Донецк: ВИК, 2009. – 372 с.

Grebyenkin, S.S., Kosarev, V.V., Topchiy, S.Ye., Stadnik, N.I., Zenzerov, V.I., Steblin, V.V., Perepelitsa, B.A., Popovskiy, V.N.; Grebyenkin, S.S. and Kosarev, V.V., eds. *Osnovy sozdaniya i effektivnoy ekspluatatsii sistem zhizneobespecheniya ochistnogo oborudovaniya dlya ugol'nykh shacht* [Fundamentals of creation and efficient operation of life support systems of the cleaning equipment for coal mines]. Donetsk, VIK Publ., 2009, 372 p.

7. Мосаковский, Я.В. Экономика горной промышленности [Текст] / Я.В. Мосаковский. – 3-е изд., стер. – М.: Горная книга, 2014. – 526 с.

Mosakovskiy, Ya.V. *Ekonomika gornoy promyshlennosti [Tekst]* [Economics of the mining industry [Text]. 3-ye izd., ster. [the 3<sup>rd</sup> stereotype edition]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2014, 526 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Ю.Ф. Булгаковым.  
Дата поступления рукописи 02.05.2017

**Vadim Leonidovich Ovcharenko**, Cand Sci. (Tech.), associate professor;

e-mail: [ovcharenko.vad@yandex.ru](mailto:ovcharenko.vad@yandex.ru)

The State Educational Institution of Higher Occupational Education “The Donetsk National Technical University” (DonNTU)

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone +38 095 525-06-16;

**Oleg Grigoryevich Kremenyev**, Cand Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: [maknii.niot@mail.ru](mailto:maknii.niot@mail.ru)

The State Institution “Makeyevka of Safety in Mines Research Institute” (MakNII)

286132, Makeyevka, 60, ulitsa Likhachyova. Phone: +38 095 847-61-35

## THE RETROSPECTIVE RISK ANALYSIS OF UNDERGROUND MINE WORKERS OF COAL MINES OF THE DONETS BASIN

**Purpose.** The retrospective risk analysis of the underground mine workers of the coal mines for working-out the measures on increase of effectiveness with it.

**Methods.** Analytical investigations of the risk dynamics of the underground mine workers at the coal mines of the Donets Basin by literature sources with the use of risk calculations according to real data of the traumatism with the retrospective review (years 1958...2013).

**Results.** The dependence of the dynamics of the traumatism risk indices with the lethal end of the underground mine workers at the coal mines of the Donets Basin is retrospectively studied. Availability of hazardous and harmful production factors on-site, dynamics of coal output and personnel strength were taken into account. The recommendations on its decrease were worked out.

**Scientific novelty.** The criterion of the technically accessible safety risk level of the coal output primary processes is ascertained. It is accepted as the initial risk index by working-out the measures of its optimization.

**Practical value.** The results obtained can be used by the working-out of the efficient measures on decrease of the risk of the underground mine workers at the coal mines of the Donets Basin.

**Keywords:** risk; risk management; professional risk level; coal output; criterion; underground mine workers; mining and mining-and-recovery operations; coal mine.

## ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Для рассмотрения принимаем только научные статьи, которые имеют такие необходимые элементы: постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами; анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение не решенных раньше частей общей проблемы, которым посвящена данная статья; формулирование целей статьи (постановка задачи); изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов; выводы из данного исследования и перспективы дальнейших работ в этом направлении.

Текст рукописи статьи (7–8 страниц, включая таблицы, рисунки) разместить на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее и нижнее 20 мм, левое 25 мм и правое 15 мм. Страницы не нумеровать (нумерацию выполнить карандашом), на последней странице – подписи авторов. Рукопись статьи оформить с применением редактора Win Word (не ниже версии 7.0), шрифтом Times New Roman, кегль 14, распечатать в одном экземпляре с высоким качеством печати (через полтора интервала) без переносов.

Порядок оформления: слева, не отступая от верхнего поля, печатать УДК; имена, отчества и фамилии авторов (не более четырех), сведения об ученой степени, должности, адрес электронной почты; наименование организации, почтовый адрес её, номер телефона; название статьи печатать прописными буквами (жирным шрифтом) без переносов, аннотация и ключевые слова (5–15). Сведения, содержащиеся в заглавии, не следует повторять в тексте аннотации. Избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

Каждый графический объект (рисунок, график, схема, фотография) следует представлять с разрешением не менее 300 dpi в формате \*.gif, \*.jpg. Все позиции, обозначения и надписи, показанные на рисунке, должны быть набраны печатными буквами, позиции – расположены по часовой стрелке и объяснены. Под каждым рисунком указывается его номер и название. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла 20...25 % общего объема статьи.

Формулы и математические знаки должны быть понятны, показатели степени и индексы – меньше основных знаков. Формулы нумеруются (справа в круглых скобках, не отступая от правого поля) только в том случае, если на них в тексте имеются ссылки. Между крайними знаками формулы и текстом межстрочный интервал увеличивается на 6 пунктов. Латинские буквы выполняются курсивом, а русские, греческие буквы и функции – прямо. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы должны иметь название, порядковый номер и располагаться после первого упоминания в тексте. Желательный объем таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не больше 10 источников, изданных не раньше чем за 20 лет) должен быть приведен в конце статьи в соответствии с принятым стандартом. Ссылки на литературу заключаются в квадратные скобки.

Необходимо представить электронную копию статьи. Статья на бумажном носителе – с визой начальника отдела.

### **Заявление о соблюдении редакционной этики**

Редакционная коллегия журнала определяет для себя следующие правила профессиональной этики.

Для авторов

1. Соблюдать нормы авторского права.
2. Фальсификацию данных, плагиат рассматривать как нарушение кодекса чести.
3. Не представлять в редакцию ранее опубликованные работы.
4. Обеспечивать возможность проверки полученных результатов другими исследователями путем понятного изложения аргументации поставленного вопроса, а также методов (способов, подходов).

Для редакторов

1. Ориентироваться на интересы читателей и авторов.
2. Обеспечивать высокое качество редактирования, оформления и представления публикуемых материалов.
3. Содействовать свободному выражению мнений на страницах журнала.
4. Следовать принципам открытости, научной честности и независимости по отношению к авторам, рецензентам и читательской аудитории.

Для рецензентов

1. Выполнять принятые на себя обязательства по рецензированию рукописей добросовестно, в установленные сроки и только в пределах профессиональной компетенции.
2. При написании рецензии следовать принципам объективности, конструктивности, непредубежденности и корректности.
3. Соблюдать конфиденциальность рецензии и не допускать возможности использования информации, полученной в ходе рецензирования, в каких-либо целях (за исключением целей, связанных с публикацией).
4. Избегать любых возможных конфликтов интересов.

# Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал  
2017, № 3(54)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик О.А. Шестакова

Верстальщик Т.Н. Филатова

Учредитель и издатель

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

**Поступившие на издание статьи проходят рецензирование**

Подписано к использованию 04.07.2017.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 311-69-52; 311-31-47

Объем 3,5 Мб

E-mail: [respirator@mail.dnmchs.ru](mailto:respirator@mail.dnmchs.ru)

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте **18 июля 2017 г.**