



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

# НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 2 (53)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

---

---

Донецк  
2016

---

---

УДК 614.8”363”+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 2 (53). – 119 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.

Утверждено к печати решением ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 3 от 31.03.2016).

#### **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	С.Г. Ехилевский (Республика Беларусь)
д-р техн. наук	В.Г. Игишев (Российская Федерация)
д-р техн. наук	В.В. Мамаев
канд. техн. наук	И.Ф. Марийчук
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 зарегистрирован Министерством информации ДНР 07.12.2015.  
Свидетельство о госрегистрации № 348.



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

**SCIENTIFIC  
BULLETIN  
OF THE NIIGD «RESPIRATOR»**

Scientific-technical journal

No. 2 (53)

Published quarterly

Found in 1970

---

---

Donetsk  
2016

---

---

UDC 614.8”363”355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal. – Donetsk, 2016. – No. 2 (53). – 119 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.

Approved for printing according to the decision of the academic council of the NIIGD “Respirator” (proceeding no.3 from 31.03.2016).

#### **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. Grebyenkin  
Dr. Sci. (Tech.) S.P. Grekov  
Dr. Sci. (Tech.) S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)  
Dr. Sci. (Tech.) B.G. Igishev (Russian Federation)  
Dr. Sci. (Tech.) V.V. Mamayev  
Cand. Sci. (Tech.) I.Ph. Mariychuk  
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. Khar'kovskiy (Republic of Kazakhstan)

The journal is registered by the Ministry of Information of the Donetsk People’s Republic 07.12.2015.  
State registration certificate no. 348.

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

**Кострубицкий А.А., Агеев В.Г.**  
Дальнобойность прерывистых струй  
жидкости при тушении пожаров

7

**Пашковский П.С.**  
Конструктивные особенности  
эжекторных пеногенераторов

15

**Греков С.П., Зинченко И.Н.**  
Формирование встречных потоков  
пожарных газов

25

**Коляда А.Ю.**  
Экспериментальное определение  
параметров локализации подземных  
пожаров водяными завесами

33

**Осадчий А.В., Дикенштейн И.Ф.,  
Турчанин В.Г.**  
Параметры установки для сушки  
пожарных рукавов

44

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

**Мамаев В.В.**  
Моделирование термодинамических  
процессов в твердых материалах при  
нагревании высокотемпературным  
воздушным потоком

53

**Зинченко И.Н., Богомаз А.М.**  
Моделирование дымоудаления при  
пожарах в зданиях с помощью  
нагнетательной вентиляции

64

**Булгаков Ю.Ф., Гребенкин С.С.,  
Буряк Д.С.**  
Локализация взрывов метановоздушной  
смеси в выработанном пространстве лав  
обрушением пород кровли

74

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

**Kostrubitskiy A.A., Ageyev V.G.**  
Range capability of interrupted fluid jets  
by fighting the fires

**Pashkovskiy P.S.**  
Constructional features of ejection foam  
generators

**Grekov S.P., Zinchenko I.N.**  
Formation of counter-current flows of fire  
gases

**Kolyada A.Yu.**  
Experimental determination of parameters  
of localization of underground fires  
with water curtains

**Osadchiy A.V., Dikenshteyn I.F.,  
Turchanin V.G.**  
Parameters of an installation for drying  
the fire hoses

***II. Safety in emergencies***

**Mamayev V.V.**  
Simulation of thermodynamic processes  
in solid materials when heating by means  
of the high-temperature air flow

**Zinchenko I.N., Bogomaz A.M.**  
Simulation of smoke removal by fires  
in buildings by means of the blowing  
ventilation

**Bulgakov Yu.F., Grebyenkin S.S.,  
Buryak D.S.**  
Localization of methane-air mixture  
explosions in the waste of longwall faces  
by means of breaking-down the roof rocks

**Бречалова М.А.**

Механизм химического загрязнения окружающей среды парами серной кислоты

85

**Brechalova M.A.**

Mechanism of chemical contamination of the environment with sulphuric acid vapours

**Добрякова Е.И.**

Изменение свойств металлов в условиях пожара

92

**Dobryakova Ye.I.**

Change of properties of metals under fire conditions

**III. Охрана труда****III. Labour protection****Пeftибай Г.И., Чапкович А.В.,  
Выпирайло Н.А.**

Эргономические характеристики ручного гидравлического насоса

102

**Peftibay G.I., Chapkovich A.V.,  
Vypiraylo N.A.**

Ergonomic characteristics of a hand-operated hydraulic pump

**Костенко И.Г., Сапунов Е.П.,  
Службин Ю.А., Борщ Т.В.**

Лабораторный портативный спектрометр ЯМР

109

**Kostenko I.G., Sapunov Ye.P.,  
Sluzhbin Yu.A., Borshch T.V.**

The NMR laboratory portable spectrometer

**Требования к оформлению статьи**

117

**Requirements of execution of an article**

## I. Пожарная и промышленная безопасность

### УДК 614.844.2

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

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

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

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

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

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

## ДАЛЬНОБОЙНОСТЬ ПРЕРЫВИСТЫХ СТРУЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ТУШЕНИИ ПОЖАРОВ

**Цель.** Моделирование движения и дальности полёта прерывистых струй жидкости перед очагом пожара в зависимости от начальной скорости истечения.

**Методика.** Основана на математической модели нестационарного движения прерывистой струи в единице её объёма.

**Результаты.** Рассмотрена динамика прерывистой струи жидкости от места подачи до её полного распада. Предложена математическая модель на основе классических уравнений движения газожидкостных систем с учётом деформации головной части струи. Получены аналитические зависимости падения скорости струи при её деформации, диаметра капель жидкости и дальности полёта прерывистой струи. Установлено, что чем больше начальная скорость истечения струи жидкости, тем больше её дальнотойность.

**Научная новизна.** Результаты исследования динамики сплошных и прерывистых струй жидкости позволяют решить вопрос повышения эффективности системы водяного пожаротушения.

**Практическая значимость.** Полученные результаты предполагается использовать при выборе параметров пожарного водомёта и оценке эффективности воздействия диспергированной воды на очаг пожара.

**Ключевые слова:** *прерывистая струя; скорость истечения; аналитическая зависимость; деформация; падение скорости; дальность полёта; диаметр сопла.*

**Постановка проблемы.** При тушении пожаров водой в различных помещениях необходимо выполнять следующие требования: дальнотойность струи, малый расход воды, максимально возможная площадь покрытия зоны горения, большая скорость поглощения теплоты и высокий охлаждающий и флегматизирующий эффект.

Тушение пожаров сплошными или компактными струями из-за малой дальности действия их активной части не позволяет эффективно воздействовать на очаг пожара на больших расстояниях и приводит к большим потерям воды. В то же время способ тушения пожаров импульсными высокоэнергетическими струями даёт возможность значительно увеличить их дальнотойность и уменьшить расход воды.

Этим требованиям в наибольшей степени отвечает способ прерывистой подачи жидкости на очаг пожара. Отличительной особенностью этого способа

является то, что из сопла водомёта выбрасывается дискретная масса жидкости в виде стержня, который пролетая в воздухе определённое расстояние, распыляется и образует аэрозольное облако над очагом пожара. Как указано в работе [1], такой механизм формирования струи в воздухе позволяет значительно (до 70 %) повысить дальность подачи жидкости.

Однако, кроме некоторых разработок экспериментальных образцов и испытаний установки импульсного водяного пожаротушения в литературе [1, 2], по сути, отсутствуют расчётные данные о дальности полёта импульсных или прерывистых струй, их распаде до образования мелких капель жидкости, об охлаждающем и флегматизирующем эффекте и, самое главное, о периодичности метания импульсной струи с целью эффективного воздействия на очаг пожара.

В то же время вызывает сомнения достоверность теоретических и экспериментальных данных в работах [3-5] о дальности полёта и избыточном давлении на выходе из сопла. Так, экспериментальные данные баллистики импульсных струй проводили при помощи порохового импульсного водомёта, ствол которого заканчивался коническим соплом с коллиматором, заполненным водой. Пороховой заряд был отделён от водяного заряда пыжом. С помощью воспламенителя пороховой заряд поджигали, и пороховые газы выталкивали водяной заряд через сопло с образованием импульсной струи. Приведена [3] система дифференциальных уравнений газовой динамики и получено их решение численным методом [4, 5]. Приведены результаты расчёта скорости истечения струи и давления внутри импульсного водомёта при пороховом заряде массой 30 г. Указывается, что при взрыве порохового заряда скорость превышала 685 м/с, а давление поднималось до 225 МПа. Вряд ли в действительности возможно превышение в два раз звуковой скорости и достижение давления, в тысячи раз превышающего атмосферное.

Экспериментальные исследования тушения газового факела [3] импульсными струями показали, что оно возможно только при расстоянии от сопла факела не более 12 м. Это говорит о сомнительности полученных данных, когда в литературе указано на положительные результаты при тушении газовых фонтанов на значительно больших расстояниях. Кроме того, если тушить пожар при горении твёрдых материалов класса А, то импульсные струи только могут на время сбить пламя, а затем оно возникнет снова из-за того, что прогреты ограждающие конструкции до высоких температур, что обычно не учитывается. Поэтому в таких случаях более эффективны сплошные и прерывистые струи.

Решить вопрос повышения эффективности системы водяного пожаротушения можно только по результатам исследований динамики сплошных и прерывистых струй, исследований теплового взаимодействия с очагом пожара жидкой дискретной фазы после распада струи и разработки на этой основе высокоэнергетической установки водяного пожаротушения.



**Цель исследований.** Моделирование движения и дальности полёта прерывистых струй жидкости перед очагом пожара в зависимости от начальной скорости истечения.

**Материалы и результаты исследований.** Для установления дальности полёта и закономерностей распада прерывистых струй будем исходить из теории движения газожидкостных систем [6, 7]. Примем, что до распада прерывистой струи можно пренебречь силами гравитации благодаря высокой скорости её движения. Вместе с тем учтём, что силы аэродинамического сопротивления возникают не только за счёт лобового столкновения с воздухом, но и бокового трения струи о воздух.

Тогда при отсутствии фазовых превращений уравнение нестационарного относительного движения каждой одиночной прерывистой струи в единице её объёма [6, 7] можно представить в виде

$$\rho_1 \frac{dw}{dt} = -(\lambda S_6 + \zeta S) \rho_2 \frac{w^2}{2V}, \quad (1)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – плотности жидкости и окружающего воздуха соответственно, кг/м<sup>3</sup>;

$w$  – продольная скорость движения струи, м/с;

$t$  – время с момента вылета струи из водомёта, с;

$\lambda$  – коэффициент бокового трения струи о воздух;

$\zeta$  – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления;

$S_6$  – площадь боковой поверхности струи, м<sup>2</sup>;

$S$  – площадь поперечного сечения струи в головной её части, м<sup>2</sup>;

$V$  – объём жидкости в импульсной струе, м<sup>3</sup>.

Для уравнения (1) примем начальное условие  $w(0) = w_0$ , где  $w_0$  – начальная скорость истечения струи, м/с.

Для получения аналитического решения задачи будем считать все параметры, входящие в уравнение (1), заранее известными величинами, за исключением искомым функций скорости  $w$  и площади  $S$  поперечного сечения струи.

При условии, что площадь боковой поверхности струи намного больше площади её поперечного сечения ( $S_6 \gg S$ ), решение уравнения (1) с начальным условием  $w(0) = w_0$  представим в виде

$$w = \frac{w_0}{1 + Cw_0 t}, \quad (2)$$

где коэффициент  $C$  решения (2) равен

$$C = \frac{\lambda S_6 \rho_2}{2 \rho_1 V}. \quad (3)$$

Так как площадь боковой поверхности струи равна  $S_6 = \pi dl$ , а объём  $V = \pi d^2 l / 4$ , то коэффициент  $C$  будет рассчитан по формуле

$$C = \frac{2\lambda \rho_2}{d \rho_1}, \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр сопла, м;

$l$  – длина прерывистой струи, м.

Анализ полученного решения (2) показывает, что скорость прерывистой струи будет уменьшаться по сравнению с начальным её значением и в зависимости от диаметра сопла.

Для определения дальности полёта сплошной части прерывистой струи используем зависимость (2) и после её интегрирования получим

$$x = \frac{1}{C} \ln(1 + C w_0 t). \quad (5)$$

Для расчёта дальности  $x_m$  полёта сплошной части прерывистой струи можно использовать формулу (5) при  $t = t_m$ .

Максимально возможную площадь поперечного сечения струи определяем по формуле

$$S_m = \left[ \pi^{0,5} \zeta \rho_2 \frac{w_0^2 V^2}{8\sigma} \right]^{0,4}. \quad (6)$$

Время  $t_m$  распада струи находим по формуле

$$t_m = \frac{1}{A_0} \ln \frac{S_m}{S_0}, \quad (7)$$

где параметр  $A_0 = \zeta \rho_2 \frac{w_0^2}{2\mu_1}$ , с<sup>-1</sup>;

$\mu_1$  – динамическая вязкость воды, кг/(м·с).

Этому времени будет соответствовать критическая скорость распада струи, определяемая по формуле (2) при  $\tau = \tau_m$ .

На рис. 1 представлены результаты расчёта дальности полёта прерывистых струй по формулам (4)-(7). При этом за объём принималась масса выбрасываемой жидкости, делённая на её плотность:  $V = m/\rho_1$ .

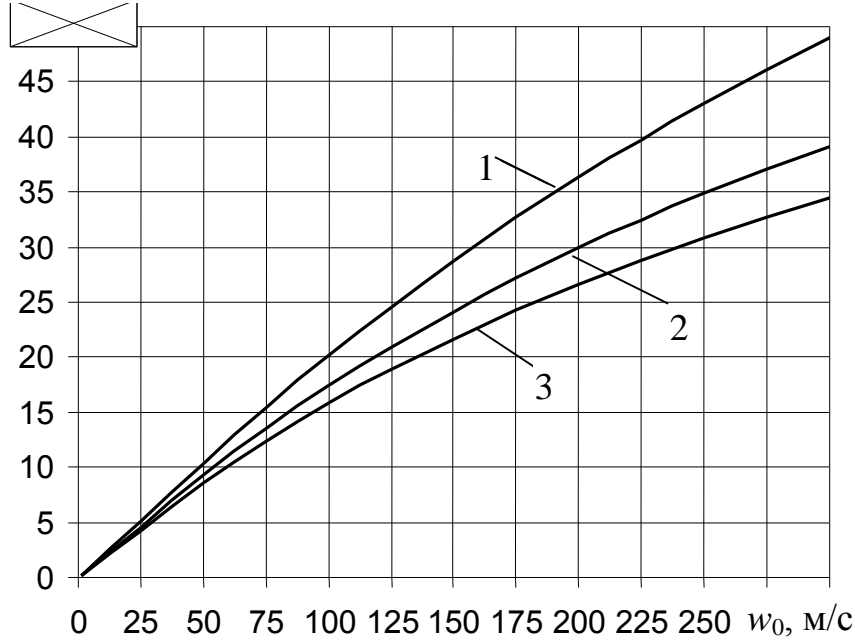


Рис. 1. Дальность полёта прерывистой струи жидкости в зависимости от скорости её истечения из сопла:

1 –  $m = 1$  кг;  $d = 0,013$  м; 2 –  $m = 2$  кг;  $d = 0,016$  м; 3 –  $m = 3$  кг;  $d = 0,019$  м

При расчётах использовали исходные данные, указанные под рис. 1, и принятые данные:  $\lambda = 0,1$ ;  $\zeta = 0,6$ ;  $\mu_1 = 800$  кг/(м·с);  $\sigma = 0,07$  кг/(м·с<sup>2</sup>);  $\rho_1 = 1000$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_2 = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>.

Как видно, чем больше объём жидкости и больше начальный диаметр сопла, тем меньше дальность полёта, что связано с ростом сопротивления движению жидкости. Примерно такую же дальность демонстрируют стволы пожарные ручные, например, ствол универсальный СПР-50У [3].

При отсутствии данных о начальной скорости полёта прерывистой струи её можно установить по данным об избыточном давлении  $\Delta P$  на выходе из сопла.

Расход воды через форсунки [6] подчиняется параболической зависимости

$$G = B\varphi F \sqrt{\rho_1 \Delta P}, \quad (8)$$

где  $G$  – расход воды, кг/с;  
 $B$  – коэффициент истечения;  
 $\varphi$  – коэффициент скорости, близкий к единице;  
 $F$  – площадь поперечного сечения сопла, м<sup>2</sup>;  
 $\Delta P$  – перепад давлений на выходе из сопла, Па.

Так как расход воды  $G = \rho_1 w_0 F$ , то вместо формулы (8) получим

$$w_0 = B\varphi \sqrt{\Delta P / \rho_1}. \quad (9)$$

Подставляя зависимость (9) в (5), можно при  $t = t_m$  определять дальность полёта сплошной части прерывистой струи по формуле

$$x_m = \frac{1}{C} \ln \left( 1 + CB\varphi \sqrt{\Delta P / \rho_0} \tau_m \right). \quad (10)$$

На рис. 2 приведены результаты расчёта по формуле (10) дальности полёта прерывистых струй в зависимости от избыточного давления на выходе из сопла. При этом принято  $B\varphi = 7$ .

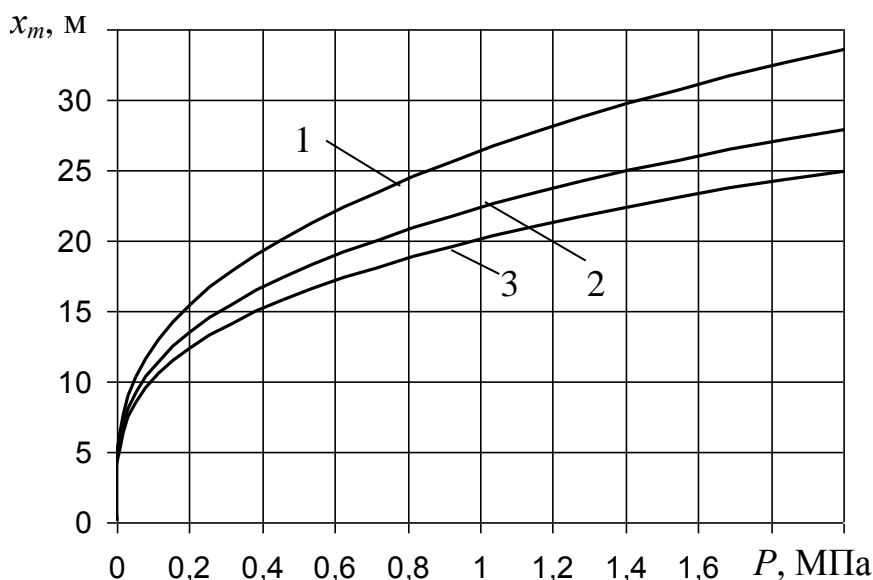


Рис.2. Дальность полёта прерывистой струи жидкости в зависимости от избыточного давления на выходе из сопла:

1 –  $m = 1$  кг;  $d = 0,013$  м; 2 –  $m = 2$  кг;  $d = 0,016$  м; 3 –  $m = 3$  кг;  $d = 0,019$  м

Как видно, уже при избыточном давлении, меньшем  $P < 0,1$  МПа, дальность полёта прерывистой струи достигает 10 м и более, а при давлении  $P = 2$  МПа дальность полёта увеличивается до 25...33 м. Этим расчётным данным полностью соответствуют экспериментальные данные, полученные в работах [1, 2]. Здесь указано, что в одном случае [1] при давлении  $P = 1,7...1,8$  МПа дальность полёта равнялась 31...32 м, а в другом случае [2] – как показали испытания, дальность метания компактной жидкой струи может быть 25...30 м при избыточном давлении на выходе из сопла  $P = 1,2...2$  МПа.

Это подтверждает достоверность полученных данных аналитических расчётов и их применимость при прогнозе эффективности воздействия на очаг пожара прерывистыми струями жидкости.

**Выводы.** Таким образом, выполненные исследования динамики прерывистых струй и закономерностей их распада, подтвержденные результатами математического моделирования и известными данными экспериментов, позволяют, используя полученные аналитические зависимости, определить время полёта сплошной части прерывистой струи, критическую скорость распада и дальность полёта до распада.

Полученные результаты можно использовать при выборе параметров пожарного водомёта и оценке эффективности воздействия диспергированной воды на очаг пожара.

### Список литературы / References

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

Yegorov, A.N., Atanov, G.A. (1995). *Opredeleniye parametrov ustanovki impul'snogo pozharotusheniya* [Determination of parameters of the impulse fire extinguishing installation]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD* [Proc. of the NIIGD «Mine-rescue work»]. Donetsk, Ukraine, pp. 38 – 45.

2. Егоров А.Н. Гидравлические параметры импульсного водомёта // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1999. – С. 62 – 69.

Yegorov, A.N. (1999). *Gidravlicheskiye parametry impul'snogo vodomyeta* [Hydraulic parameters of the pulsed water cannon]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD* [Proc. of the NIIGD «Mine-rescue work»]. Donetsk, Ukraine, pp. 62 – 69.

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

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

4. Семко А.Н. Внутренняя баллистика порохового водомёта и гидропушки // Теоретическая и прикладная механика: науч.-техн. сб. / ДонНУ. – Харьков: Основа, 2002. – Вып. 35. – С. 181 – 185.

Semko, A.N. (2002). *Vnutrennyaya ballistika porokhovogo vodomyeta i gidropushki* [Interior ballistics of the gun powder water cannon and hydraulic

monitor]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika: nauch.-tekhn. sb.* / DonNU [Proc. of the DonNU], Kharkov: Osnova Publ., Ukraine, issue 35, pp. 181 – 185.

5. Семко А.Н. Импульсные струи жидкости высокого давления. – Донецк: Вебер (Донецкое отделение), 2007. – 149 с.

Semko, A.N. (2007). *Impul'snyye strui zhidkosti vysokogo davleniya* [Pulse high-pressure fluid jets]. Donetsk: Veber Publ. (Donetsk branch), Ukraine, 149 p.

6. Кутателадзе С.С. Гидродинамика газожидкостных систем. – М.: Энергия, 1976. – 296 с.

Kutateladze, S.S. (1976). *Gidrodinamika gazozhidkostnykh sistem* [Hydrodynamics of gas-fluid systems]. Moscow: Energiya Publ., Russia, 296 p.

7. Кутателадзе С.С. Анализ подобия в теплофизике. – Новосибирск: Наука, 1982. – 280 с.

Kutateladze, S.S. (1982). *Analiz podobiya v teplofizike* [Analysis of likeness in thermal physics]. Novosibirsk: Nauka Publ., Russia, 280 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.  
Дата поступления рукописи 18.03.2016

*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, Shchors st. Phone (+38062) 340-62-28;  
Vladimir Grigor'yevich Ageyev, Cand. Sci. (Tech.), director; e-mail: [niigd@mail.ru](mailto:niigd@mail.ru);  
the "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;  
283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38 062) 311-39-89*

## RANGE CAPABILITY OF INTERRUPTED FLUID JETS BY FIGHTING THE FIRES

**Purpose.** Simulation of motion and flight range of the interrupted fluid jets in front of a seat of fire depending on the initial flow velocity.

**Methods.** The methods are based on the mathematical model of the non-stationary motion of the interrupted jet in the unit of its volume.

**Results.** The dynamics of the interrupted fluid jet is considered from the point of its feed up to its total disintegration. The mathematical model in terms of the classic equations of motion of the gas-fluid systems subject to deformation of the jet head is proposed. The analytical dependence of the velocity decrease of the jet by its deformation, that one of diameter of fluid drops and that one of the flight range of the interrupted jet are received. It is established that the greater is the initial velocity of the fluid jet outflow, the greater is its range capability.

**Scientific novelty.** The results of investigation of dynamics of the continuous and interrupted fluid jets allow solving the question of effectiveness increase of the water firefighting system.

**Practical value.** It is intended to use the results received by choice of parameters of a fire water cannon and estimation of efficiency of influence of the dispersed water on the seat of fire.

**Keywords:** *interrupted jet; flow velocity; analytical dependence; deformation; velocity decrease; flight range; diameter of the nozzle.*

## УДК 614.843.8

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-69-77*

### КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЖЕКЦИОННЫХ ПЕНОГЕНЕРАТОРОВ

**Цель.** Обоснование конструктивных параметров генераторов пены средней и высокой кратности эжекционного типа.

**Методика.** Аналитические и экспериментальные исследования процессов генерирования воздушно-механической пены на сетках при эжекционной подаче воздуха.

**Результаты.** Проведенные теоретические и экспериментальные исследования условий образования воздушно-механической пены позволили обосновать конструктивные параметры генераторов эжекционного типа. Установлена взаимосвязь между кратностью воздушно-механической пены и интенсивностью подачи пенообразующего раствора на сетки.

**Научная новизна.** Обоснованы конструктивные параметры пеногенераторов с эжектированием воздуха.

**Практическая значимость.** Предложенный метод расчета конструктивных параметров эжекционного пеногенератора позволяет повысить эффективность тушения пожаров воздушно-механической пеной.

**Ключевые слова:** *пенообразование; эжекционная подача воздуха; пеногенератор; пенообразующий раствор.*

**Постановка задачи.** Многолетний опыт применения воздушно-механических пен в различных странах показывает их высокую эффективность при тушении различных пожаров в зданиях, сооружениях, жилом секторе, промышленных объектах поверхностного и подземного базирования. Особенностью пены является возможность объемного тушения пожаров [1].

Однако, особенно в последние годы, пенные способы пожаротушения подвергаются иногда необоснованной критике. При этом нужно иметь в виду, что со временем меняются составы и свойства пенообразующих растворов, а разработанные ранее пеногенераторы в этих условиях оказываются недостаточно эффективными.

Время и эффективность тушения пожаров напрямую зависят от качества воздушно-механической пены, то есть от ее кратности и структуры пузырьков [2], что может быть обеспечено только конструкцией пеногенератора. Основными параметрами пеногенераторов эжекционного типа, определяющими качество и характеристики получаемой пены, являются [3]:

- параметры распылителя раствора пенообразователя, другими словами, взаимосвязь рабочего давления, расхода, карты орошения сетки (пакета сеток), размера и скорости капель пенообразующего раствора с их способностью эжектировать воздух из внешнего пространства и соответственно генерировать пену, имеющую заданную кратность и размер пузырьков;

- геометрические размеры корпуса пеногенератора, которые должны оптимально соответствовать параметрам струи распылителя и обеспечивать подсос необходимого количества воздуха для наполнения пузырьков пены;
- геометрические размеры ячеек и форма сетки (пакета сеток), которые должны соответствовать оптимально набегающему капельно-воздушному потоку. Непременное условие – весь раствор пенообразователя после сеток должен быть в виде пленок, а весь эжектированный воздух – находиться внутри пузырьков пены.

**Результаты исследований.** Процесс пенообразования в генераторах с эжектированием воздуха осуществляется следующим образом. Под давлением воздушного потока на ячейках сетки происходит деформация капель пенообразующего раствора. Кинетическая энергия воздушного потока затрачивается на образование пузырьков и преодоление гидравлического сопротивления при прохождении двухфазного потока через сетку.

Исследованиями установлено, что пеногенерация на сетках возможна только в некотором интервале скоростей набегающего потока на сетку. Диапазон этого интервала зависит от концентрации пенообразователя в растворе и от размеров ячеек сетки. Минимальное значение скорости воздуха обусловлено силами капиллярного давления, которые возникают при формировании пузырьков. Для того чтобы на ячейках образовался пузырек пены, необходимо перед ячейкой создать давление, превышающее капиллярное давление в пузырьке. Когда давление торможения будет равно капиллярному давлению, справедливо следующее соотношение:

$$v_{\min} = \varphi \sqrt{\frac{8g\sigma}{\rho_B a}}, \quad (1)$$

где  $v_{\min}$  – минимальная скорость набегающего на сетку воздушного потока, м/с;

$\varphi$  – коэффициент, определяющий потери энергии на трение;

$g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;

$\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;

$\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>;

$a$  – размер ячейки сетки, м.

Формула (1) позволяет определить минимальную скорость набегающего потока воздуха при условии, что сетка помещена в открытом пространстве. В пеногенераторе воздух движется в канале корпуса. В этом случае начало пенообразования определяется значением полного напора перед сеткой, равного сумме статического и динамического напора. Минимальный напор можно определить по формуле

$$P_{\min} = 4 \frac{\varphi^2 \sigma}{a}, \quad (2)$$

где  $P_{\min}$  – минимальный напор перед сеткой, Па.



Следует иметь в виду, что процесс пенообразования начнется только при скорости воздушного потока, превышающей минимальную. При увеличении скорости может наступить такой момент, когда произойдет разрыв пенного потока. Максимальная скорость потока воздуха, при которой прекращается пенообразование, зависит от свойств пенообразователя и размера ячейки сетки [4]. Оптимальная скорость потока примерно в 4 раза меньше максимальной скорости и может быть вычислена по формуле

$$v_{\text{вп}} = 0,25 \frac{\xi}{\pi a}, \quad (3)$$

где  $v_{\text{вп}}$  – оптимальная скорость воздушного потока, м/с;

$\xi$  – величина, зависящая от концентрации пенообразователя (для применяемых в настоящее время пенообразователей  $\xi = 0,06 \dots 0,09 \text{ м}^2/\text{с}$ ).

Основными элементами конструкции пеногенераторов эжекционного типа являются: распылитель, конус с окнами для эжектирования воздуха, корпус диффузора и пакет сеток (рис. 1).

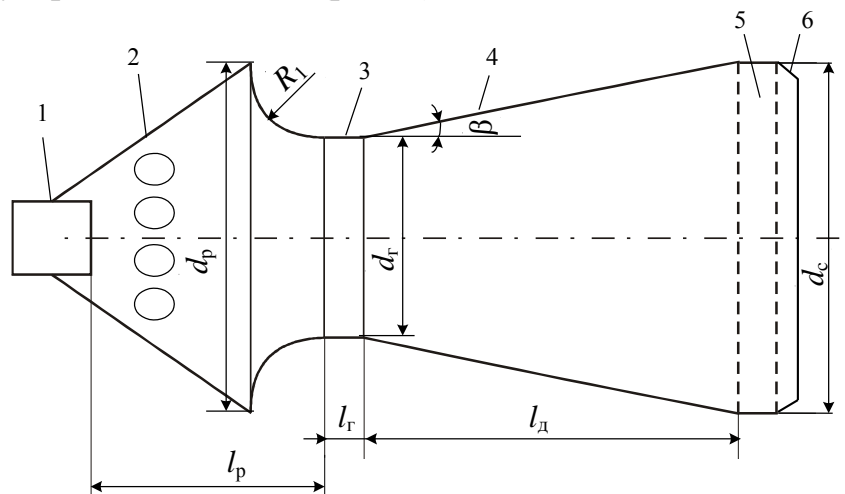


Рис. 1. Схема эжекционного пеногенератора:

1 – распылитель; 2 – конус с окнами; 3 – горловина; 4 – корпус диффузора;  
5 – пакет сеток; 6 – конфузор

Конфигурация корпуса пеногенератора и его геометрические характеристики в значительной степени определяют количество эжектируемого воздуха.

Корпус пеногенератора состоит из конфузора, диффузора, горловины и раструба.

К геометрическим характеристикам корпуса относятся:

$d_c$  – диаметр пакета сеток;

$l_d$  – длина диффузора;

$d_r$  – диаметр горловины;

$l_\gamma$  – длина горловины;

$l_p$  – длина раструба;

$\beta$  – угол конусности диффузора.

Угол конусности определяется из условия наименьших гидравлических потерь. Сопротивление диффузора складывается из потерь на трение и вихреобразование двухфазного потока. Вихревые потери вызывают отрыв пограничного слоя пенообразующего раствора от стенок диффузора. Они зависят от угла раскрытия диффузора  $\alpha = 2\beta$  и играют главную роль в работе пеногенератора [5]. Вихревые потери в диффузоре можно оценить как смягченное сопротивление удара пенообразующего раствора о стенки диффузора:

$$\Delta P = \Psi \Delta P_{уд}, \quad (4)$$

где  $\Delta P$  – смягченное сопротивление удара, Па;

$\Psi$  – коэффициент полноты сопротивления удару;  $0 \leq \Psi \leq 1$ ;

$\Delta P_{уд} = \rho \left( \frac{v_{вх} - v_p}{2} \right)^2$  – потери сопротивления удару, Па;

$v_{вх}$  – скорость потока на входе в диффузор, м/с;

$v_p$  – скорость потока на выходе из диффузора, м/с.

Экспериментальные исследования показали, что  $\Psi$  является функцией только угла раскрытия диффузора (рис. 2). При  $\alpha = 0$   $\Psi = 0$ , т.е. удара нет. Максимальное значение  $\Psi = 1$  достигается при  $\alpha = 60^\circ$ . Обычно угол раскрытия выбирается равным  $\alpha = 6 \dots 10^\circ$ , которому соответствует значение  $\Psi = 0,15 \dots 0,2$ . В этой области не наблюдается отрыва струи от стенки диффузора. Вместе с тем при  $\alpha = 6 \dots 10^\circ$  значительно увеличивается длина диффузора.

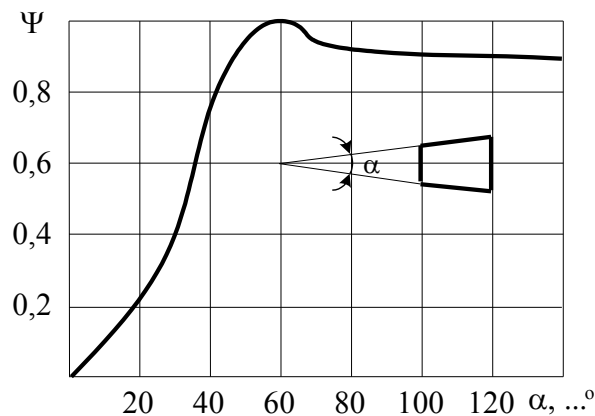


Рис. 2. Значение функции  $\Psi = f(\alpha)$

Обычно рекомендуют длину диффузора принимать равной  $l_d \cong (4 \dots 6)d_r$  в зависимости от отношения  $d_p/d_r$ , где  $d_p$  – диаметр выходного отверстия раструбы. В работе [1] рекомендовано длину диффузора принимать равной  $l_d \approx (1 \dots 1,5)d_c$ .

Длина горловины выбирается из условия уменьшения потерь энергии на входе и равна

$$l_r = 0,72d_c. \quad (5)$$

Вход в горловину должен быть плавным, при этом  $R_1 = 1,5d_r$ .

Существенную роль в характеристике эжекционного пеногенератора играет распылитель, который должен обеспечивать равномерное орошение сеток, а угол раскрытия струи раствора пенообразователя должен быть таким, чтобы между стенками диффузора и внешними границами не было зазора. Это обеспечивает максимальный подсос воздуха.

Оптимальная скорость выхода пены определяется по формуле

$$v_{\text{п}} = 0,25 \frac{\lambda}{\pi a}, \quad (6)$$

где  $v_{\text{п}}$  – оптимальная скорость выхода пены, м/с;

$\lambda = 0,06 \dots 0,09 \text{ м}^2/\text{с}$  – эмпирический коэффициент скорости пенообразования на сетке.

Задавая производительность генератора по пене, определяют диаметр пакета сеток:

$$d_c = \sqrt{\frac{4 q_{\text{п}}}{\pi v_{\text{п}}}}, \quad (7)$$

где  $q_{\text{п}}$  – производительность генератора по пене, м<sup>3</sup>/с.

Остальные параметры пеногенератора рассчитывают по диаметру сеток  $d_c$ :

$$d_r = d_c - 2g \operatorname{tg} \beta. \quad (8)$$

При угле раскрытия струи раствора пенообразователя, равном 40°

$$l_p = 0,65d_c. \quad (9)$$

Существующие эжекционные пеногенераторы позволяют получать пену средней кратности, не более 70...100 [6]. Повышение производительности эжекционных пеногенераторов без увеличения их габаритов возможно только за счет повышения кратности пены. Конструирование эжекционных пеногенераторов для получения пены высокой кратности должно основываться на выборе таких геометрических размеров, параметров распыленного раствора пенообразователя и интенсивности орошения сетки, чтобы получить максимальный коэффициент эжекции. В таких пеногенераторах распыленный раствор пенообразователя движется на сетку в потоке эжектируемого им воздуха. Так как движение струи пенообразующего раствора происходит при постоянном давлении, то количество движения, сообщенное воздуху, определяется по формуле

$$m_{\text{в}} v_{\text{в}} = m_{\text{ж}} (v_0 - v_x), \quad (10)$$

где  $m_B, m_{ж}$  – масса эжектируемого воздуха и распыленного раствора пенообразователя соответственно, кг;

$u_B$  – средняя скорость воздуха, м/с;

$u_0, u_x$  – начальная скорость раствора пенообразователя на выходе из сопла форсунки и скорость ее в момент соприкосновения с корпусом пеногенератора соответственно, м/с.

Эжектирование воздуха распыленным раствором пенообразователя происходит на расстоянии от среза сопла форсунки до точки соприкосновения распыленной струи с горловиной корпуса пеногенератора. Приняв, что эжектируемый воздух движется в спутном потоке диаметром  $d$ , равном диаметру горловины корпуса пеногенератора, найдем среднюю скорость движения воздуха:

$$u_B = \frac{4Q_B}{\pi d_r^2}, \quad (11)$$

где  $u_B$  – средняя скорость эжектируемого воздуха, м/с;

$Q_B$  – расход эжектируемого воздуха, м<sup>3</sup>/с;

$d_r$  – диаметр горловины пеногенератора, м.

Скорость эжектируемого воздуха можно определить из дифференциального уравнения движения капли раствора в воздушном потоке. Во время ее движения к ней приложены сила тяжести, направленная перпендикулярно движению, и сила сопротивления воздуха, направленная по касательной к траектории в данной точке в противоположную сторону движения. Так как в пеногенераторе используется активная зона распыленного раствора пенообразователя, то силой тяжести можно пренебречь.

Дифференциальное уравнение движения капли по оси  $x$  (по ходу движения струи от распылителя к сетке) имеет вид

$$m_{кп} \frac{dv}{dx} = - \frac{\varepsilon f_{кп} \rho_B v}{2}, \quad (12)$$

где  $m_{кп}$  – масса капли, кг;

$v$  – скорость капли, м/с;

$\varepsilon$  – коэффициент гидродинамического сопротивления капли;

$f_{кп}$  – площадь миделева сечения капли, м<sup>2</sup>;

$\rho_B$  – плотность воздуха, кг/м<sup>3</sup>.

В случае ламинарного режима движения капли ( $Re \leq 1$ ) коэффициент сопротивления можно представить в виде [4]

$$\varepsilon = \frac{24}{Re}; \quad Re = \frac{v d_{кп}}{\nu}, \quad (13)$$

где  $d_{кп}$  – средний диаметр капли, м;

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

На основании проведенных экспериментальных исследований [4] (применительно к низконапорным форсункам) получена следующая эмпирическая формула для определения среднего диаметра капли:

$$d_{\text{кп}} = 0,0075d_{\text{ф}}\ln(k\Delta P d_{\text{ф}}), \quad (14)$$

где  $d_{\text{кп}}$  – диаметр капли, м;

$d_{\text{ф}}$  – диаметр сопла форсунки, м;

$k = 28$  – эмпирический коэффициент, 1/(Па·м);

$\Delta P$  – перепад давления на форсунке, Па.

Условие движения капли по оси  $x$  имеет вид

$$x_0 = 0; v_x = v_0. \quad (15)$$

Интегрируя уравнение (12) с учетом соотношений (13) и (15), получим скорость капли в любой точке:

$$v_x = v_{\text{вп}} - \frac{18\mu x}{\rho_{\text{по}}d_{\text{кп}}^2}, \quad (16)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость воздуха, Па/с;

$\rho_{\text{по}}$  – плотность раствора пенообразователя, кг/м<sup>3</sup>.

После соответствующих подстановок уравнение (10) примет вид

$$\rho_{\text{в}} \frac{Q_{\text{в}}^2}{d_{\text{д}}^2} = \rho_{\text{по}} Q_{\text{по}} \frac{18\mu x}{\rho_{\text{по}}d_{\text{кп}}^2}, \quad (17)$$

где  $Q_{\text{по}}$  – расход пенообразующего раствора, м<sup>3</sup>/с.

После умножения равенства (17) на выражение  $\frac{d_{\text{д}}^2}{Q_{\text{по}}\rho_{\text{в}}}$  и преобразований получим

$$K^2 = \frac{d_{\text{д}}^2}{d_{\text{кп}}^2} \frac{18\mu x}{\rho_{\text{в}}Q_{\text{в}}}, \quad (18)$$

или

$$K = \frac{d_{\text{д}}}{d_{\text{кп}}} \sqrt{\frac{18\mu x}{\rho_{\text{в}}Q_{\text{в}}}}, \quad (19)$$

где  $Q_{\text{в}}$  – расход эжектируемого воздуха, м<sup>3</sup>/с;

$K$  – объемный коэффициент эжекции или кратность пены.

Подставив формулу (14) в (19), получим

$$K = \frac{d_{\text{д}}}{0,0075d_{\text{ф}}\ln(\alpha\Delta P d_{\text{ф}})} \sqrt{\frac{18\mu x}{\rho_{\text{в}}Q_{\text{в}}}}, \quad (20)$$

где  $x = l_p$  – длина раструба, м.

Геометрические размеры пеногенератора определяются по следующим формулам:

- длина диффузора, м

$$l_d = \frac{d_d - d_r}{2 \operatorname{tg} \frac{\beta}{2}}; \quad (21)$$

- длина раструба, м

$$l_p = \frac{d_r}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}; \quad (22)$$

- длина конфузора, м

$$l_k = \frac{d_k - d_r}{2 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}}, \quad (23)$$

где  $d_d$  – диаметр диффузора генератора, м;

$d_r$  – диаметр горловины  $d_r = 0,74 d_d$ , м;

$\beta$  – угол конусности диффузора, ...° ( $\beta = 13^\circ$ );

$\alpha$  – угол распыления струи, ...° ( $\alpha = 44^\circ$ );

$d_k$  – диаметр конфузора, м;

$\gamma$  – угол сужения конфузора, ...° ( $\gamma = 90^\circ$ ).

На основании изложенных выше методических подходов разработан и изготовлен эжекционный пеногенератор воздушно-механической пены. С его использованием выполнен комплекс экспериментальных исследований по возможности повышения кратности пены путем изменения интенсивности орошения сеток пенообразующим раствором (рис. 3).

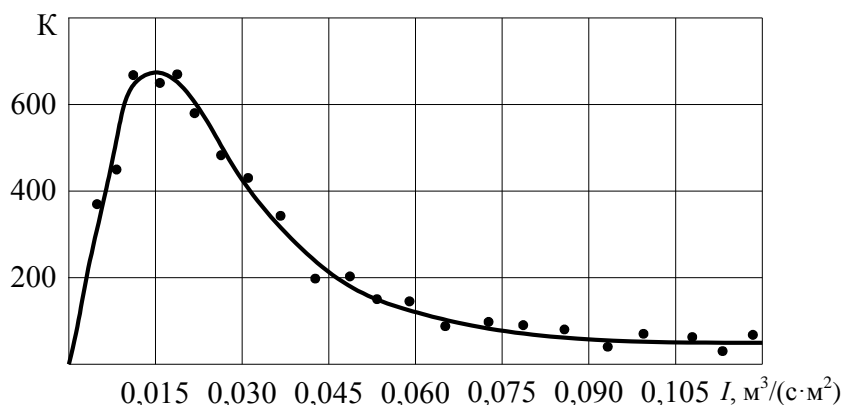


Рис. 3. Зависимость кратности воздушно-механической пены от интенсивности орошения сеток пенообразующим раствором

Установлено, что воздушно-механическая пена максимальной кратности 600...700 образуется при интенсивности орошения сеток данного эжекционного пеногенератора, равной  $0,01...0,02 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ . Далее, с увеличением интенсивности орошения сеток, кратность пены снижается и после подачи пенообразующего раствора с интенсивностью  $0,5 \text{ м}^3/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$  и более стабилизируется на уровне 70...140.

**Выводы.** На основании проведенных исследований обоснованы конструктивные параметры эжекционного пеногенератора воздушно-механической пены. Установлена зависимость кратности пены от интенсивности орошения сеток пенообразующим раствором в эжекционном пеногенераторе с учетом его оптимальных конструктивных параметров.

### Список литературы / References

1. Ильин С.М., Пешков В.В., Реутт М.В. Система объемного пожаротушения пеной высокой кратности с генераторами эжекционного типа // Комплексная безопасность России – исследование, управление, опыт: Междунар. симпозиум (Москва, 30 – 31 мая 2002 г.): сб. матер. – М.: Изд-во ВНИИГОЧС, 2002. – С. 328.

Il'in, S.M., Peshkov, V.V., Reutt, M.V. (2002). *Sistema obyemnogo pozharotusheniya penoy vysokoy kratnosti s generatorami ezheksionnogo tipa* [The volume firefighting system with the generators, ejection type]. *Kompleksnaya besopasnost Rossii – issledovaniye, upravleniye, opyt: Mezhdunar. Simpozium (Moskva, 30 – 31 maya 2002 g.* [The complex safety of Russia – investigation, management, experience] [Proc. of the International Symposium (Moscow, May, 30 – 31, 2002)]. Moscow: VNIIGOChS Publ., Russia, p. 328.

2. Воевода С.С. Исследование свойств высокократной противопожарной пены // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 5. – С. 86 – 88.

Voyevoda, S.S. *Issledovaniye svoystv vysokokratnoy protivopozharnoy peny* [Investigation of properties of the high expansion firefighting foam]. *Pozharovzryvobesopasnost* [Fire-explosion safety], 2004, no. 5, pp. 86 – 88.

3. Безродный И.Ф. Забытые имена..., или Почему не тушит пена?.. // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 12. – С. 49 – 55.

Bezrodnyy, I.F. *Zabytyye imena..., ili Pochemu ne tushit pena?..* [Forgotten names..., or Why the foam does not fight the fire?..]. *Pozharovzryvobesopasnost* [Fire-explosion safety], 2011, no. 12, pp. 49 – 55.

4. Пашковский П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 792 с.

Pashkovskiy, P.S. (2013). *Endogennyye pozhary v ugolnykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk: Knowledge Publ., Ukraine, 792 p.

5. Гончаров И.Н. Перспективы разработки и применения эжекционного генератора пены высокой кратности // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи (Пожежна безпека – 2013): матер.

XI Міжнар. наук.-практ. конф. (25 – 26 вересня 2013 р.). – Київ: УкрНДІЦЗ, 2013. – С. 371.

Goncharov, I.N. (2013). *Perspektivy razrabotki i primeneniya ezheksionnogo generatora peny vysokoy kratnosti* [Prospects of development and application of the high expansion foam generator, ejection type]. *Pozhezhna bezpeka ta avariino-riatival'na sprava: stan, problemy i perspektivy (Pozhezhna bezpeka – 2013): mater. 11 Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (25 – 26 veresnia 2013 r.)* [Fire safety and rescue work (Fire safety – 2013): mater. of the 11<sup>th</sup> Int. theoretical and practical conf., Kyiv, September, 25 – 26, 2013]. Kyiv, UkrNDITsZ, Ukraine, p. 371.

6. Корольченко Д.А. Надежное пожаротушение с наименьшим расходом пенообразователя // Пожарная безопасность в строительстве. – 2011. – № 4. – С. 40.

Korol'chenko, D.A. *Nadyezhnoye pozharotusheniye s naimen'shim raskhodom penoobrazovatelya* [The safe fighting of the fire with the lowest consumption of the foam solution]. *Pozharnaya besopasnost v stroitel'stve* [Fire safety in the construction], 2011, no. 4, p. 40.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 10.03.2016

*Pyetr Semyenovich Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director on science; the "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR; e-mail: [niigd@mail.ru](mailto:niigd@mail.ru); 283048, 157, Donetsk. Phone (+38 062) 311-69-77*

## CONSTRUCTIONAL FEATURES OF EJECTION FOAM GENERATORS

**Purpose.** Substantiation of constructional parameters of the foam generators, ejection type, producing the medium or high expansion foam.

**Methods.** Analytical and experimental investigations of the processes of generation of the air-mechanical foam on the nets by ejection air delivery.

**Results.** The theoretical and experimental investigations of conditions of formation of the air-mechanical foam allowed substantiating the constructional features of the generators, ejection type. The interaction between expansion of the air-mechanical foam and intensity of delivery of the foam solution on the nets is established.

**Scientific novelty.** The constructional parameters of the foam generators with air ejection are substantiated.

**Practical value.** The method of calculation of the constructional features of the ejection foam generator proposed permits to raise the efficiency of fighting the fires with the air-mechanical foam.

**Keywords слова:** *foam generation; ejection air delivery; foam generator; foam solution.*



**УДК 622.41: 622.822**

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

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

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

**ФОРМИРОВАНИЕ ВСТРЕЧНЫХ ПОТОКОВ ПОЖАРНЫХ ГАЗОВ**

**Цель исследования.** Создать математические модели полей скоростей движения и концентраций пожарных газов, исследовать закономерности формирования встречных потоков пожарных газов, изучить изменение параметров потока в двухфазной области течения (температура, концентрации компонентов пожарных газов) на различной стадии развития горения.

**Методы.** Теоретический анализ и обобщение материалов по существующим моделям перемещения пожарных газов в горных выработках.

**Результаты.** Сформулированы условия образования и движения пожарных газов. Показано, что распределение температуры и концентрации компонентов пожарных газов имеет сложный характер и зависит от ламинарного и турбулентного режимов движения.

**Научная новизна.** Получено аналитическое решение для моделей профиля скоростей и концентраций пожарных газов перед очагом горения.

**Практическая ценность.** Разработанная математическая модель взаимодействия высокотемпературных потоков позволяет определять длину шлейфа пожарных газов по концентрации оксида углерода.

**Ключевые слова:** шахта; выработка; пожар; опрокидывание потока; скоростная структура; пожарные газы; поле концентраций; оксид углерода; отравление.

**Постановка проблемы.** При подземных пожарах в наклонных и даже в горизонтальных выработках угольных шахт возникают встречные потоки продуктов горения под кровлей, которые могут попадать на свежие струи и создавать угрозу отравления.

В результате формируется группа выработок, в которых содержатся опасные для человека вредные вещества – зона распространения продуктов горения. Определение выработок, входящих в эту зону, – важная и сложная проблема, которую необходимо решать заранее для всех потенциально опасных участков (выработок) шахты.

**Основная часть.** Исследуя скоростную структуру вентиляционного потока при встречных движениях пожарных газов, принимают, что поток делится на две части (входящий и выходящий из помещения [1, 2]). При этом скорости на стенках выработки не обращаются в нуль, как это имеет место в действительности.

Для описания скорости движения пожарных газов необходимо одновременно учитывать ламинарный и турбулентный режимы течения с обращением скорости в нуль на стенках выработки. Уравнение движения в этом случае для продольной составляющей скорости [3] можно записать в виде

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 \rho u}{\partial y^2} - \frac{\lambda |u|}{2d} \rho u + f_x, \quad (1)$$

где  $P$  – давление, Па;

$x$  – пространственная координата, направленная вдоль выработки, м;

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

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

$u$  – скорость движения пожарных газов, м/с;

$y$  – пространственная координата, направленная по высоте выработки от центра её симметрии, м;

$\lambda$  – коэффициент аэродинамического сопротивления выработки;

$d$  – приведенный диаметр выработки, м;

$f_x$  – проекция вектора силы плавучести газов на ось  $x$ , кг/(м·с)<sup>2</sup>.

Второе слагаемое в уравнении (1) учитывает ламинарность, а третье слагаемое учитывает турбулентность потока газов.

В проекциях на ось  $y$  примем, что поперечные размеры выработки неизмеримо малы по сравнению с продольными и поэтому можно не учитывать потери на трение и записать

$$0 = -\frac{\partial P}{\partial y} + f_y, \quad (2)$$

где  $f_y$  – проекция вектора силы плавучести газов на ось  $y$ , кг/(м·с)<sup>2</sup>.

На рис. 1 приведена схема проветривания наклонной выработки с указанием вектора ускорения свободного падения.

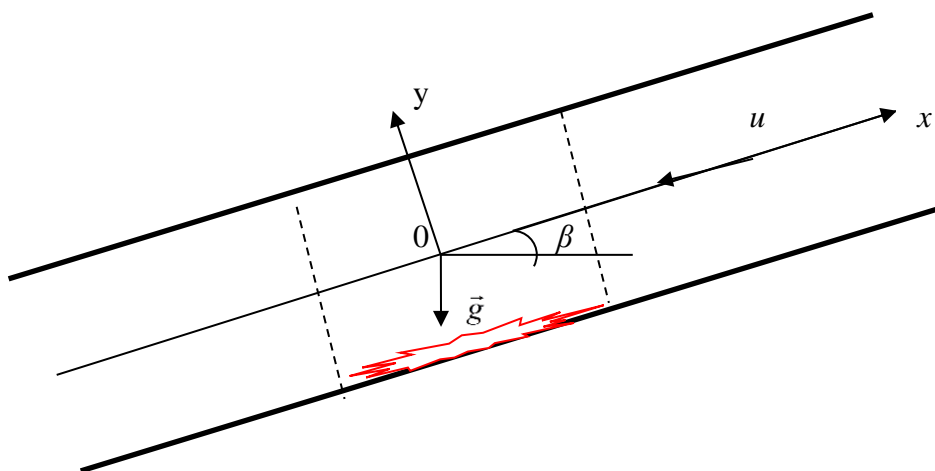


Рис. 1. Схема наклонной выработки с указанием зоны горения и вектора ускорения свободного падения

Проекции вектора плавучести газов принимают равными

$$\left. \begin{aligned} f_x &= \frac{\rho_0}{k} (T/T_0 - 1) g \sin \beta; \\ f_y &= \frac{\rho_0}{k} (T/T_0 - 1) \cos \beta, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где  $\rho_0$  – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;  
 $T$  – текущая температура газа, К;  
 $T_0$  – начальная температура, К;  
 $g$  – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с<sup>2</sup>;  
 $\beta$  – угол наклона выработки к горизонту, рад;  
 $k$  – коэффициент термического расширения воздуха.

Подставляя формулы (3) в уравнения (1) и (2) и избавляясь от давления, получим

$$\rho_0 v \frac{\partial^2 \tilde{u}}{\partial y^2} - \frac{\lambda \rho_0 |\tilde{u}|}{2d} \tilde{u} = \frac{\rho_0 g}{k} \cos \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} y - \frac{\lambda \rho_0 |\tilde{u}_1|}{2d} \tilde{u}_1, \quad (4)$$

где  $\tilde{u} = \rho u / \rho_0$  – скорость, м/с;  
 $\tilde{u}_1$  – средняя по сечению скорость, м/с;  
 $\bar{T} = T/T_0$  – относительная температура.

Входящая в уравнение (4) температура в первом приближении является функцией только от  $x$  и равна

$$T(x) = T_0 + (T_1 - T_0) \exp \left[ \left( \frac{\tilde{u}_1}{2a} - \sqrt{\frac{\tilde{u}_1^2}{4a^2} + \frac{\bar{\alpha}}{a}} \right) x \right], \quad (5)$$

где  $a$  – коэффициент температуропроводности воздуха, м<sup>2</sup>/с;  
 $\bar{\alpha}$  – приведенный коэффициент теплообмена со стенками выработки, 1/с.

Выделяя частное решение уравнения (4) с учётом только турбулентного режима ( $v = 0$ ), получим

$$\tilde{u}_ч = \sqrt{\left| \tilde{u}_1 \tilde{u}_1 - \frac{2dg}{\lambda k} \cos \beta \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} y \right|}. \quad (6)$$

Если под корнем будет отрицательная величина, то принимают это число без знака, а знак минус ставят перед корнем.

Из полученной формулы следует, что так как температура вне пожара уменьшается с удалением от него, то производная от температуры будет всегда отрицательной. Следовательно, под корнем второе слагаемое в формуле (5) над осью симметрии выработки всегда положительное. Поэтому при восходящем проветривании над осью скорость воздуха будет увеличиваться, а при нисходящем проветривании – уменьшаться. При отрицательной скорости воздуха над осью выработки произойдёт опрокидывание потока при определённых условиях, а под осью – увеличение скорости.

При только турбулентном движении, как видно, скорость воздуха на стенках выработки не обращается в нуль. Об этом говорят и данные [2]. Однако у стенок выработки существует пограничный ламинарный слой, и здесь скорость должна обращаться в нуль [3].

Решение уравнения (4) при  $|\tilde{u}| = |\tilde{u}_1|$  можно представить в виде

$$\tilde{u} = B_1 \exp(n_1 y) + B_2 \exp(n_2 y) + \tilde{u}_q,$$

где  $B_1$  и  $B_2$  – константы интегрирования, м/с, а показатели степени

$$n_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{\lambda |\tilde{u}_1|}{2\nu d}}. \quad (7)$$

Константы интегрирования определены из условия, что на кровле и почве выработки скорость обращается в нуль, а на оси симметрии она равна скорости основного потока.

Исходя из этих условий получим

$$B_1 = -B_2 = \frac{\text{sign}(y)\tilde{u}_q \left[ \text{sign}(y)H / 2 \right]}{\exp(n_2 H / 2) - \exp(n_1 H / 2)}, \quad (8)$$

где  $H$  – высота выработки, м.

Как показывают результаты расчёта по формулам (5) – (8), при отсутствии пожара (рис. 2) профиль скорости воздуха при учёте ламинарного и турбулентного режимов движения наиболее точно описывает скоростную структуру потока воздуха в отличие от обычно используемой кривой параболы для ламинарного потока либо прямой линии при турбулентном движении, когда на стенках выработки скорость не равна нулю.

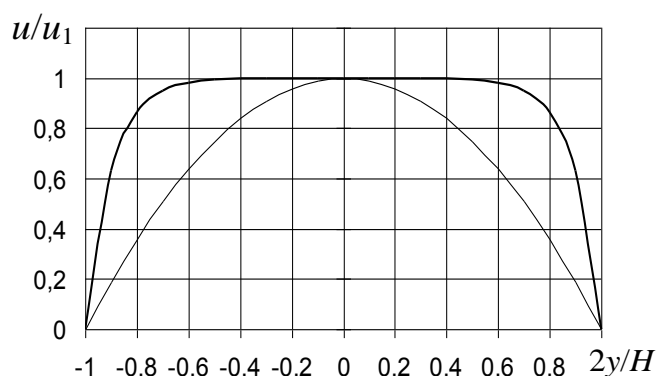


Рис. 2. Профиль скорости воздуха до пожара при ламинарном (тонкая линия) и турбулентном (жирная линия) режимах движения

При расчётах принимали наиболее соответствующие реальному объекту исходные данные: скорость воздуха  $u_1 = 1,0$  м/с; высота выработки и приведенный диаметр  $d = H = 2$  м; коэффициент аэродинамического сопротивления выработки  $\lambda = 0,1$ ; коэффициент кинематической вязкости воздуха  $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>/с [4].

На рис. 3 представлены результаты расчёта профиля скорости воздуха перед очагом пожара, когда скорость основного потока отрицательная.

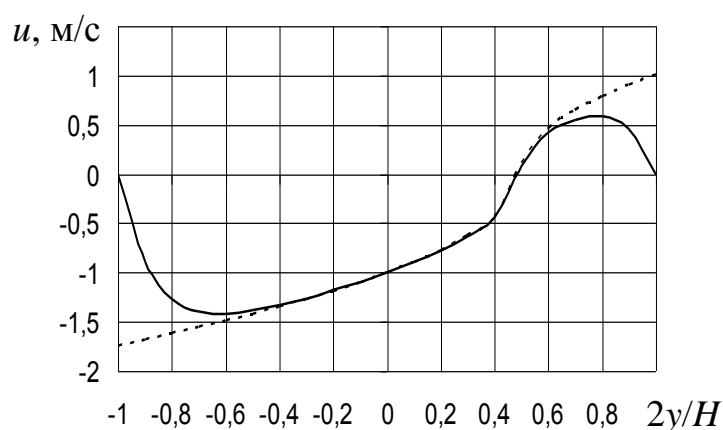


Рис. 3. Профиль скорости воздуха перед пожаром на расстоянии 10 м при смешанном режиме течения (жирная линия) и при только турбулентном режиме (штриховая линия)

Анализ полученных результатов показывает, что при отсутствии пожара профиль скорости воздуха симметричен оси выработки и поток идет в одном направлении. При возникновении пожара ядро потока смещается к почве выработки и воздух как бы оттесняется от кровли. Наконец, наступает такой момент, когда в верхней части выработки происходит опрокидывание потока.

На расстоянии 10 м от очага пожара (см. рис. 3) происходит опрокидывание потока воздуха. В верхней части выработки, несмотря на отсутствие движения воздуха у самой кровли, скорость против основного движения даже превышает 0,5 м/с при средней 1 м/с.

При расчётах использовали те же исходные данные, что и в предыдущем примере и плюс дополнительные данные: ускорение свободного падения  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ; угол наклона выработки к горизонту  $\beta = 0$ ; коэффициент термического расширения воздуха  $k = 2,5$ ;  $x = 10 \text{ м}$ .

Образующиеся в зоне горения пожарные газы будут распространяться по потоку воздуха и против него под действием турбулентной диффузии и конвекции. Для исследования распространения пожарных газов, особенно оксида углерода, используем уравнение сохранения компоненты газовой смеси за пределами очага пожара:

$$\tilde{u} \frac{dZ}{dx} = D \frac{d^2Z}{dx^2} + \gamma(Z_0 - Z), \quad (9)$$

где  $Z$  – объемная доля одного из пожарных газов (оксида углерода), %;

$Z_0$  – фоновая объемная доля одного из пожарных газов, %;

$D$  – коэффициент турбулентной диффузии пожарного газа,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$\gamma$  – коэффициент газообмена со стенками выработки,  $\text{с}^{-1}$ .

Решение уравнения (9) можно представить в безразмерном виде:

$$\bar{Z} = \frac{Z - Z_0}{Z_1 - Z_0} = \exp \left[ \left( \frac{\tilde{u}}{2D} - \sqrt{\frac{\tilde{u}^2}{4D^2} + \frac{\gamma}{D}} \right) x \right], \quad (10)$$

где  $Z_1$  – объемная доля пожарного газа в зоне горения, %.

Таким образом, задав исходные параметры, можно по формулам (6) и (10) найти распределение концентраций пожарных газов по всей выработке с очагом пожара.

На рис. 4 приведены данные об объемной доле пожарного газа на различных расстояниях перед очагом пожара при средней скорости движения воздуха 1,0 м/с. Остальные исходные данные принимали такими:  $D = 5 \text{ м}^2/\text{с}$  и  $\gamma = 0,03 \text{ с}^{-1}$ .

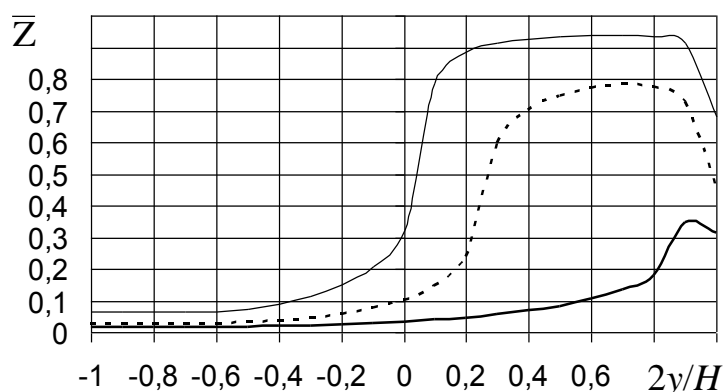


Рис. 4. Объемная доля пожарного газа перед зоной горения на расстоянии 5 (жирная линия), 10 (штриховая линия) и 15 м (тонкая линия)

Результаты моделирования показывают, что даже на расстоянии  $x = 30$  м объемная доля оксида углерода в средней части выработки может достигнуть 0,005 %, если в зоне горения она составляет 5 %. В то же время под кровлей выработки на этом же расстоянии она может достигать даже 0,5 %. Это объясняется эффектом турбулентной диффузии газа против потока воздуха.

**Выводы.** Разработана математическая модель взаимодействия высокотемпературных потоков, которая позволяет получить аналитические решения для описания профилей скорости и концентраций пожарных газов по длине и высоте выработки. Это даёт возможность определять длину шлейфа пожарных газов не только по длине встречного потока воздуха, а ещё и по концентрации самого опасного газа – оксида углерода, что значительно увеличивает допустимую длину вредного воздействия очага пожара на окружающую среду.

### Список литературы / References

1. Драйздел Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

Draizdel, D. (1990). *Vvedeniye v dinamiku pozharov* [An introduction to fire dynamics]. Moscow: Stroyizdat Publ., Russia, 424 p.

2. Кравченко Н.М. Влияние поперечной составляющей температурного градиента на образование встречного потока пожарных газов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2008. – Вып. 45. – С. 116 – 123.

Kravchenko, N.M. (2008). *Vliyaniye poperechnoy sostavlyayushchey temperaturnogo gradienta na obrazovaniye vstrechnogo potoka pozharnykh gazov* [Influence of the transverse component of the temperature gradient on formation of the counter-flow of fire gases]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD*

"Respirator" [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, Ukraine, issue 45, pp. 116 – 123.

3. Лойцянский Л.Г. Механика жидкостей и газов. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

Loytsyanskiy, L.G. (2003). *Mekhanika zhidkostey i gazov* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Drofa Publ., Russia, 840 p.

4. Осипов С.Н., Жадан В.М. Вентиляция шахт при подземных пожарах. – М.: Недра, 1973. – 152 с.

Osipov, S.N., Zhadan, V.M. (1973). *Ventilyatsiya shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation of mines by underground fires]. Moscow: Nedra Publ., Russia, 152 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.  
Дата поступления рукописи 29.01.2016

*Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: [obep.niigd@list.ru](mailto:obep.niigd@list.ru);  
Igor Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech.), deputy head of department; e-mail: [zinstar@mail.ru](mailto:zinstar@mail.ru);  
the "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;  
283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38 062) 311-13-52*

## FORMATION OF COUNTER-CURRENT FLOWS OF FIRE GASES

**Purpose of investigation.** To create the mathematical models of the motion rates and concentrations fields of the fire gases, to investigate the tendencies of formation of the counter-flows of the fire gases, to study the changes of the flow parameters in the two-phase area of the flow (temperature, concentrations of components of fire gases) at the various stage of combustion development.

**Methods.** Theoretical analysis and generalization of materials according to existing models of movement of the fire gases in mine workings.

**Results.** The conditions of formation and motion of the fire gases are formulated. It is shown that the distribution of the temperature and concentration of the fire gases components has the complicated character and depends on the laminar and turbulent conditions of the motion.

**Scientific novelty.** The analytical solution for the models of the profile of the rates and concentrations of the fire gases in front of the heat source is received.

**Practical value.** The mathematical model of interaction of the high-temperature flows worked-out allows determining the length of the fire gases trail according to the carbon oxide concentration.

**Keywords:** mine; mine working; fire; flow reversal; high-speed structure; fire gases; concentration field; carbon oxide; poisoning.



УДК 622.822.7:[614.844.2:621.647.3]

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-10-84*

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПОДЗЕМНЫХ ПОЖАРОВ ВОДЯНЫМИ ЗАВЕСАМИ**

**Цель.** Подтвердить экспериментами правильность теоретического определения расходной характеристики распылителя воды, коэффициента распределения тонкораспыленной воды в пространстве горной выработки и размещения распылителей по сечению выработки.

**Методика.** Экспериментальные исследования.

**Результаты.** Определены расходная характеристика распылителя и коэффициент распределения воды.

**Научная новизна.** Определение коэффициента распределения и его учет позволяют повысить точность расчета параметров локализации подземных пожаров.

**Практическая значимость.** Повышение надежности и эффективности водяных завес, используемых для локализации подземных пожаров.

**Ключевые слова:** локализация; распылитель; расходная характеристика; коэффициент расхода; коэффициент распределения воды; водяная завеса.

**Постановка проблемы.** Одним из основных способов борьбы с подземными пожарами является локализация пожара в определенном объеме горной выработки и удержание его в таком же объеме в процессе активного тушения. Горноспасательные службы используют для этих целей морально устаревшие установки ВВР-1. Параметры водяных завес, образуемых этими установками, не рассчитывают и не регулируют, что часто приводит к тому, что они не выполняют своего функционального назначения и пожар не удается локализовать.

Нормативы расхода воды для образования завес не учитывают, сколько воды, поданной в выработку, принимает участие в локализации, а сколько оседает на поверхность выработки. Ответы на эти вопросы позволят обосновать параметры завесы.

**Анализ последних исследований и публикаций.** В работах [1, 2] выполнены теоретические исследования процесса распыления жидкости центробежно-струйными распылителями и рационального расположения этих распылителей при локализации пожара в горной выработке.

В работах [3, 4] дан анализ методов расчета процесса распыления воды из оросителя. Однако экспериментальное подтверждение проведенных исследований отсутствует.

В работе [5] описаны экспериментальные исследования процесса испарения распыленной воды при её движении через пламя, однако условия их проведения отличаются от реальных условий локализации подземных пожаров.

**Цель статьи.** Экспериментальное исследование расходной характеристики центробежно-струйного распылителя, распределения распыленной воды с целью разработки рекомендаций по рациональному расположению распыливающих устройств, которое обеспечивает эффективное использование подаваемой жидкости для локализации подземных пожаров в горных выработках.

**Материалы исследований.** Испытания распылителей РВ-10 проводили по стандартной процедуре (рис. 1). Испытательный стенд состоит из бака для воды, насоса для создания напора в системе, манометра 3 для контроля давления, создаваемого насосом, обратного вентиля для регулирования необходимого давления в системе, вентиля 5 для подачи воды на распылители, манометра 6 для контроля давления на распылителе, испытываемого распылителя, испытательной камеры и расходомера. Сливной кран предназначен для слива воды из бака.

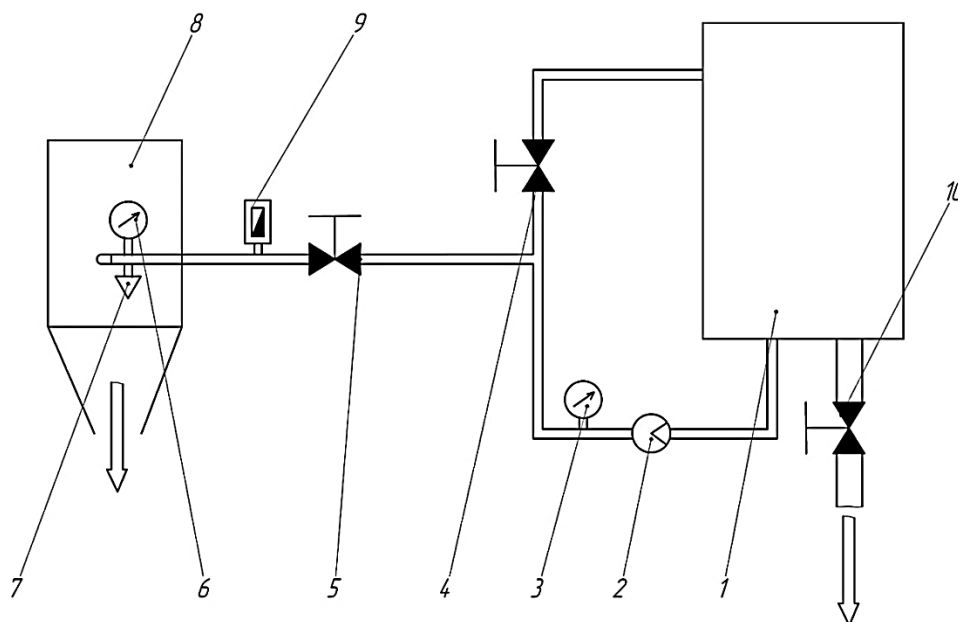


Рис. 1. Функциональная схема стенда для проведения испытаний для определения коэффициента расхода распылителей:

1 – бак; 2 – насос; 3, 6 – манометры; 4, 5 – вентили; 7 – распылитель;  
8 – испытательная камера; 9 – расходомер; 10 – сливной кран

Из бака вода по трубопроводу поступает к насосу, далее в разветвление по направлению на распылитель и обратный слив, на участке обратного слива размещен вентиль для регулирования в системе заданного давления и расхода воды через распылитель, на другой ветви трубопровода размещены вентиль 5 для регулирования подачи воды в трубопровод, а за вентилем вмонтирован расходомер для измерения расходов воды и манометр 6 для контроля давления перед распылителем.

Метод испытаний состоит в определении расходов воды прямым измерением объема воды, которая поступает из распылителя.

Испытания проводили следующим образом.

1. Включали насос и измеряли расходы воды из распылителя под давлением от  $(0,06 \pm 0,03)$  до  $(0,66 \pm 0,03)$  МПа с интервалом  $(0,10 \pm 0,03)$  МПа.

2. Измеряли расходы воды при каждом значении давления в течение не менее 60 с.

3. Для каждого значения давления  $P_i$ , Па, рассчитывали коэффициент расхода  $K_i$  (K-фактор) по формуле

$$K_i = \frac{Q_i}{\sqrt{P_i}}, \quad (1)$$

где  $Q_i$  – расход воды, л/мин.

4. Рассчитывали среднее значение коэффициента расхода распылителя в каждой серии испытаний по формуле

$$\bar{K} = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n}, \quad (2)$$

где  $n$  – количество испытаний в серии.

Результаты испытаний представлены на рис. 2.

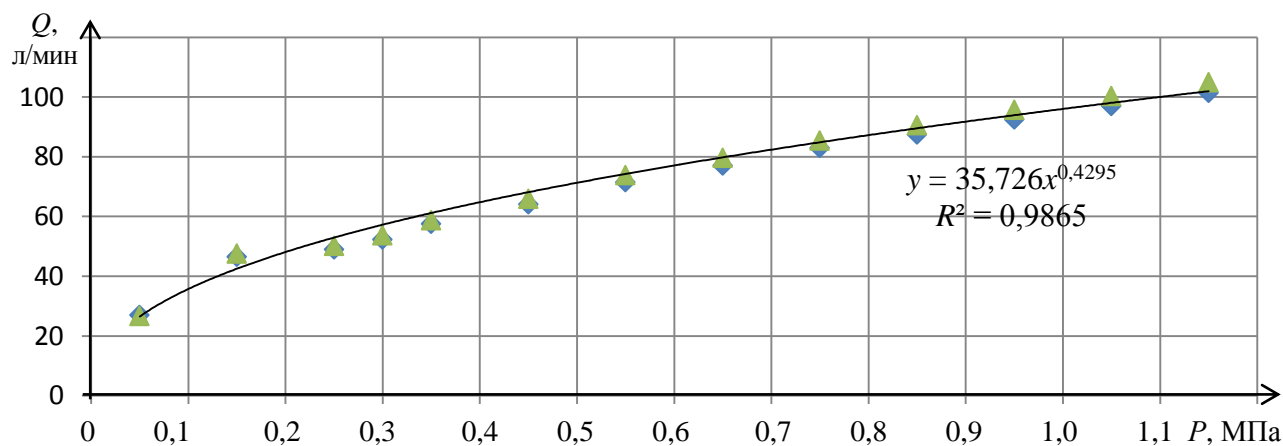


Рис. 2. Расходная характеристика распылителя

С большой степенью точности (коэффициент корреляции  $R^2 = 0,98651$ ) расходную характеристику центробежно-струйного распылителя РВ-10 можно описать следующей эмпирической зависимостью:

$$Q = 35,726P^{0,4259}. \quad (3)$$

Последующие экспериментальные исследования процесса локализации пожаров проводили на экспериментальной штольне НИИГД «Респиратор».

Угол раскрытия струи тонкораспыленной воды в зависимости от давления перед распылителем определяют визуально (рис. 3).

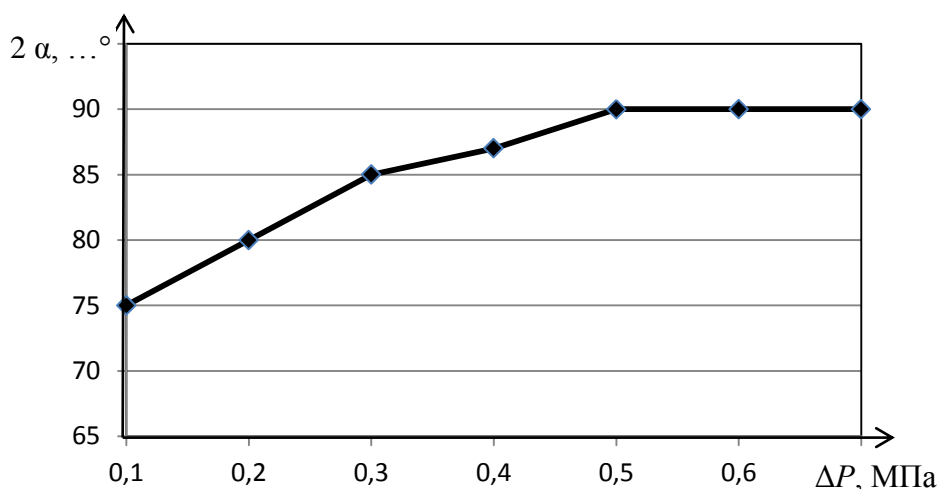


Рис. 3. Зависимость угла распыления от перепада давления на распылителе

Тонкораспыленная вода, расходуемая на локализацию пожара в горной выработке, делится на воду, находящуюся во взвешенном состоянии и движущуюся вместе с потоком пожарных газов, и воду, осевшую, не успев испариться, на поверхность (почву, кровлю, боковые стенки) выработки. Соотношение этих расходов определяет коэффициент распределения воды  $K_p$ , зависящий от месторасположения распылителя в горной выработке, скорости и угла вылета капель, скорости потока пожарных газов.

Соотношение времени полета и времени испарения капель определяет коэффициент испарения  $K_{исп}$ . Произведение коэффициента испарения воды  $K_{исп}$  на коэффициент распределения  $K_p$  называется коэффициентом локализации:

$$K_L = K_{исп} K_p, \quad (4)$$

он определяет массовую долю воды, превращающейся в пар, снижая температуру газового потока. Этот коэффициент является важнейшей характеристикой водяной завесы, определяющей эффективность локализации пожара на конкретном объекте.

Для подтверждения результатов теоретических исследований распределения капель тонкораспыленной воды, приведенных в работе [2], проведены экспериментальные исследования на штольне НИИГД «Респиратор» (рис. 4).

Насосную установку располагали в подвальном помещении лабораторного корпуса. Воду под давлением подавали по трубопроводу или пожарному рукаву в штольню к распылителям. Давление, создаваемое насосной установкой, измеряли при помощи манометра. Объемный расход воды измеряли с помощью водяного счетчика, порог чувствительности которого не превышает  $0,020 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Время измеряли секундомером.

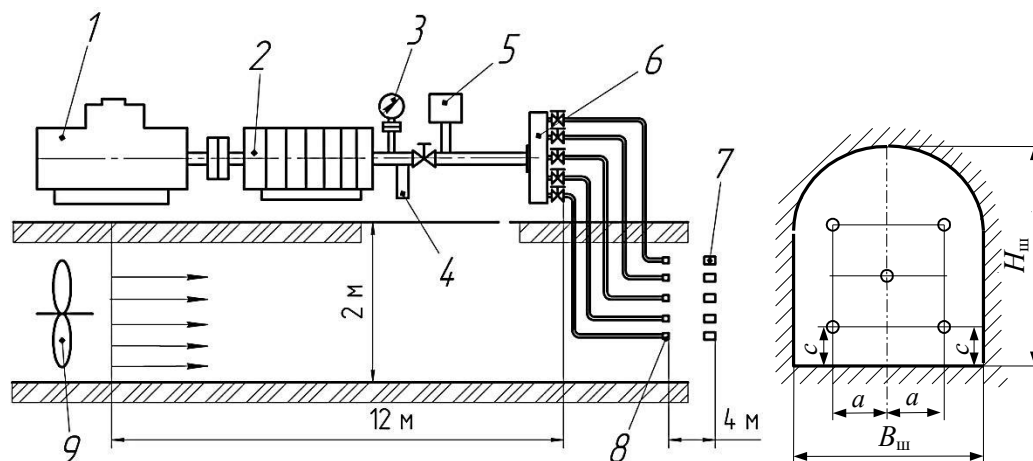


Рис. 4. Экспериментальная установка для определения параметров локального пожара:

- 1 – электродвигатель; 2 – насосная станция; 3 – манометр; 4 – аварийный сброс;  
 5 – счетчик воды; 6 – коллектор; 7 – ловушки для воды; 8 – распылитель воды;  
 9 – вентилятор;  $a$  – координата по горизонтали, м;  $c$  – координата по вертикали, м;  
 $B_{шт}$  – ширина выработки, м;  $H_{шт}$  – высота выработки, м

Коллектор с распылителями закрепляли на специальной распорной стойке. Распыленная до мелкодисперсного состояния вода подхватывается потоком воздуха, создаваемого вентилятором, и транспортируется по штольне, попадая в специальные ловушки, расположенные на телескопической раме и на почве штольни.

Всего на коллекторе размещали пять распылителей, каждый из которых открывался с помощью крана независимо от остальных. Расположение распылителей в сечении определялось шириной и высотой штольни.

Ловушка состояла из корпуса и резервуара вместимостью  $130 \text{ см}^3$ . На телескопической раме размещали 20 ловушек с 1-го номера по 20-й. Количество жидкости, выпавшей на почву, измеряли семью ловушками, закрепленными на специальной раме, которую располагали на почве под переносной телескопической рамой. Вместимость ловушек  $135 \text{ см}^3$ .

Скорость потока воздуха измеряли анемометром.

Максимальная подача  $Q_v$  вентилятора штольни, измеренная при полностью открытых шибере и крышке диффузора, равна  $540 \text{ м}^3/\text{мин}$  ( $9 \text{ м}^3/\text{с}$ ). При площади сечения штольни  $4,2 \text{ м}^2$  максимально возможная скорость потока будет равна  $2 \text{ м/с}$ . Исходя из этого эксперимент проводили при двух подачах вентилятора:  $540$  и  $270 \text{ м}^3/\text{мин}$ , что соответствует скоростям потока  $2$  и  $1 \text{ м/с}$ .

В экспериментах использованы испытанные центробежно-струйные распылители РВ-10. Распылитель образует равномерно заполненный конус мелкодисперсной воды с диаметром капель  $d_0 = 0,3 \text{ мм}$  при давлении перед распылителем  $0,6 \text{ МПа}$ . Угол раскрытия струи  $90^\circ$ , диаметр выходного отверстия распылителя  $10,0 \text{ мм}$ , расход воды  $q_p = 0,0013 \text{ м}^3/\text{с}$  ( $4,63 \text{ м}^3/\text{ч}$ ).

Количество жидкости, транспортируемой вентиляционным потоком и выпадающей на почву выработки, определялось в зависимости от следующих параметров:

- давления воды на входе в распылитель (0,4; 0,5 и 0,6 МПа);
- скорости вентиляционного потока (2 и 1 м/с);
- количества работающих распылителей (5 и 1);
- расстояния от места установки распылителей.

Порядок проведения экспериментов:

- открывали необходимое количество распылителей;
- раму с ловушками ставили в определенном сечении штольни и в этом же сечении ставили ловушки для измерения количества выпадающей на почву жидкости;
- устанавливали нужный вентиляционный режим;
- включали водяной насос и устанавливали нужное давление;
- в момент окончания набора жидкости ловушками выключали насос и вентилятор.

Расход воды через распылитель определяли по формуле (6).

При давлениях  $\Delta P$ , равных 0,4; 0,5; 0,6 МПа, получаем расход воды через распылитель  $q_p$ , равный 0,0011; 0,0012; 0,0013 м<sup>3</sup>/с.

Расчетное значение расхода мелкодисперсной воды, проходящей через начальное сечение (в месте размещения коллектора с распылителями, в 12 м от вентилятора):

$$Q_{\text{жо}} = n_p q_p, \quad (5)$$

где  $n_p$  – количество используемых в эксперименте распылителей. Расход воды, проходящей в единицу времени через данное сечение, определяем из соотношения

$$Q_{\text{ж}} = \frac{S_{\text{в}} \sum_{i=1}^n v_i}{n S_{\text{лов}} \tau}, \quad (6)$$

где  $S_{\text{в}}$  – площадь измеряемого сечения штольни, м<sup>2</sup>;

$v_i$  – объем воды в  $i$ -й ловушке, м<sup>3</sup>;

$n$  – количество ловушек в измеряемом сечении штольни ( $n = 20$ );

$S_{\text{лов}}$  – площадь входного сечения ловушки, м<sup>2</sup>;

$\tau$  – время, с.

При  $S_{\text{в}} = 4,2 \text{ м}^2$ ;  $S_{\text{лов}} = 64 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $n = 20$

$$Q_m = 32,8 \frac{\sum_{i=1}^n v_i}{\tau}. \quad (7)$$

Расход воды, выпадающей на единицу длины почвы штольни, определяем из соотношения

$$q_{\text{жп}} = \frac{S_{\text{п}} \sum_{i=1}^{n_{\text{п}}} v_i}{n_{\text{п}} S_{\text{лов}} \tau b}, \quad (8)$$

где  $q_{\text{жп}}$  – объем воды, выпадающей в единицу времени на единицу длины почвы штольни,  $\text{м}^3/(\text{с} \cdot \text{м})$ ;

$S_{\text{п}} = bL_p$  – площадь участка почвы, на котором проводят измерения,  $\text{м}^2$ ;

$L_p$  – ширина рамы с ловушками,  $\text{м}$ ;

$n_{\text{п}}$  – количество ловушек на почве;  $n_{\text{п}} = 7$ ;

$b$  – длина отмеряемого слоя выпавшей воды,  $\text{м}$ .

При  $b = 0,08 \text{ м}$ ;  $n_{\text{п}} = 7$

$$q_{\text{жп}} = 42,4 \frac{\sum_{i=1}^{n_{\text{п}}=7} v_i}{\tau}. \quad (9)$$

Расход воды, оседающей на боковые стенки и кровлю участка штольни длиной  $L$ ,  $\text{м}$ , определяем по зависимости

$$Q_{\text{жбк}} = Q_{\text{жо}} - Q_{\text{ж}} - q_{\text{жп}} L. \quad (10)$$

Коэффициент распределения воды  $K_p$ , %, т.е. долю воды, транспортируемой потоком газов, определяли из соотношения

$$K_p = \frac{Q_{\text{ж}}}{Q_{\text{жо}}} 100. \quad (11)$$

При пожаре именно эта часть воды испаряется и охлаждает поток пожарных газов. Расстояние между сечениями, в которых проводили измерения, равно  $L = 4 \text{ м}$ .

Вначале определяли места рационального размещения распылителей по сечению штольни. Включали поочередно распылители ( $n_p = 1 \dots 5$ ) и проводили измерения и расчеты (табл. 1).

Коэффициент  $K_p$  увеличивается с ростом давления на входе в распылитель. По мере увеличения координаты  $a$  коэффициент снижается, т.е. большее количество жидкости оседает на боковых стенках выработки. Наибольшее значение  $K_p$  достигнуто при расположении распылителя в точке с координатами:  $a = 0$ ;  $c = 1,5 \text{ м}$ .

Таким образом, распыливающее устройство установки локализации подземных пожаров должно отвечать следующим условиям:

- распылители необходимо располагать в выработках таким образом, чтобы каждый находился от стенок (кровли) выработки на расстоянии не менее  $0,5 \text{ м}$ ;

- свободное распределение распылителей в распыливающем устройстве (коллекторе), т.е. должна быть обеспечена возможность уменьшения или

увеличения расстояния между распылителями и поверхностью защищаемой выработки;

• при расположении распылителей в коллекторе (см. рис. 4) координаты их должны отвечать условиям

$$a < \frac{B_{\text{ш}}-1}{2}; c < \frac{H_{\text{ш}}-1}{3}, \quad (12)$$

где  $B_{\text{ш}}$ ,  $H_{\text{ш}}$  – соответственно ширина и высота выработки, м.

Таблица 1

Значение коэффициента распределения  $K_p$  при различном расположении распылителя

Перепад давления на входе в распылитель $\Delta P$ , МПа	$Q_{\text{ж0}}$ , М <sup>3</sup> /ч	$Q_{\text{ж}}$ , М <sup>3</sup> /ч	$Q_{\text{жп}}$ , М <sup>3</sup> /ч	$Q_{\text{жбк}}$ , М <sup>3</sup> /ч	Коэффициент распределения, %		
					$K_p$	$K_{\text{расч}}$	$\Delta K$
Количество распылителей $n_p = 1$ . Расположение распылителя: $a = 0$ ; $c = 1,5$ м							
0,4	3,87	2,05	1,21	0,61	0,53	0,48	9,43
0,5	4,26	2,51	1,11	0,64	0,59	0,61	3,39
0,6	4,63	3,56	0,75	0,32	0,77	0,72	6,50
$n_p = 1$ ; $a = 0,5$ ; $c = 1,5$							
0,4	3,87	1,58	1,24	1,05	0,41	0,38	7,31
0,5	4,26	2,13	1,20	0,93	0,50	0,45	10
0,6	4,63	2,78	1,05	0,80	0,59	0,54	8,47
$n_p = 1$ ; $a = 1,0$ ; $c = 1,5$ м							
0,4	3,87	0,81	1,77	1,28	0,21	0,19	9,52
0,5	4,26	1,07	1,30	1,89	0,25	0,24	4,0
0,6	4,63	1,53	0,99	2,11	0,33	0,29	12,1
$n_p = 1$ ; $a = 0,5$ ; $c = 1,0$							
0,4	3,87	1,19	1,65	1,03	0,31	0,29	6,5
0,5	4,26	1,79	1,35	1,12	0,42	0,36	14,2
0,6	4,63	2,32	1,09	1,22	0,50	0,47	6,1

Адекватность представленной в работе [2] модели процесса движения диспергированной жидкости в горной выработке подтверждается достаточно близкой сходимостью значений  $K_p$ , полученных в экспериментах и рассчитанных по модели. Ошибка не превышала 14,7 %, а среднеквадратичное отклонение в 12 опытах  $\Delta K = 0,012$  %. На следующем этапе определяли



значения коэффициента распределения воды при одновременной работе пяти распылителей (табл. 2).

Таблица 2

Значение коэффициента распределения воды  $K_p$  при одновременной работе всех распылителей установки

Давление воды в коллекторе $\Delta P$ , МПа	$V_0$ , м/с	$Q_{ж0}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{ж}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{жп}$ , м <sup>3</sup> /ч	$Q_{жбк}$ , м <sup>3</sup> /ч	$K_p$
Скорость вентиляционного потока $V = 1,0$ м/с						
0,4	6,9	3,87	2,05	1,44	0,38	0,53
0,5	7,8	4,26	2,39	1,39	0,48	0,56
0,6	8,8	4,63	2,96	1,17	0,49	0,64
0,7	9,2	4,94	3,50	0,86	0,58	0,71
0,8	9,8	5,24	4,04	0,53	0,67	0,77
Скорость вентиляционного потока $V = 2,0$ м/с						
0,4	6,9	3,87	2,17	1,36	0,34	0,56
0,5	7,8	4,26	2,60	1,24	0,42	0,61
0,6	8,8	4,63	3,10	1,00	0,53	0,67
0,7	9,2	4,94	3,60	0,66	0,67	0,73
0,8	9,8	5,24	4,24	0,32	0,68	0,81

Коэффициент распределения воды растет с увеличением давления на входе в распылитель, т.е. с ростом скорости вылета капель из распылителя.

С увеличением скорости вентиляционного потока коэффициент распределения увеличивается, т.е. капли дольше остаются в потоке, не осаждаваясь на поверхность, и испаряются, снижая температуру пожарных газов.

### Выводы

1. Подтверждена адекватность разработанной теоретической модели движения капель мелкораспыленной жидкости совместно с потоком нагретых пожарных газов в пространстве, ограниченном поверхностью горной выработки. Это позволило обосновать коэффициент распределения воды, определяющий, какая часть воды из общего расхода поданной в выработку жидкости находится во взвешенном состоянии и за счет испарения участвует в локализации пожара.

2. Коэффициент распределения зависит от давления перед распылителями, вентиляционного режима и расстояния от распылителя до поверхности выработки.

3. На коэффициент распределения влияет давление перед распылителем. Например, он возрастает на 64 % при увеличении давления на 35 %. Зависимость от скорости вентиляционного потока пожарных газов выражена

слабее. Коэффициент распределения возрастает не более чем на 10 % при увеличении скорости вентиляционного потока в 2 раза.

4. Выбрано оптимальное размещение распылителей в сечении горной выработки. При этом распылительное устройство установки локализации должно отвечать следующим условиям:

- распылители должны располагаться в выработке на расстоянии не менее 0,5 м от её поверхности;
- свободное распределение распылителей в распыливающем устройстве установки, т.е. должна быть обеспечена возможность уменьшения или увеличения расстояния между распылителями и поверхностью выработки;
- координаты расположения распылителей относительно оси выработки должны отвечать условиям (9).

5. Распылители должны быть направлены в сторону движения потока пожарных газов. При этом увеличивается дальность полета капель жидкости, т.е. длина завесы, а следовательно, и её эффективность. Капли, оседающие на поверхность выработки, увлажняют еще не успевшие прогреться твердые горючие материалы пожарной нагрузки, что повышает их огнестойкость.

### Список литературы / References

1. Коляда А.Ю. Процесс распыления жидкости центробежно-струйной форсункой с усеченным конусоидальным вкладышем // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 145 – 152.

Kolyada, A.Yu. (2013). *Protsess raspyleniya zhidkosti tsentrobezchno-struynoy forsunkoy s usechyennym konusoidal'nyim vkladyshem* [The process of liquid atomization with a centrifugal spray injector having a cone-shaped insert]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, Ukraine, issue 50, pp. 145 – 152.

2. Ющенко Ю.Н., Коляда А.Ю., Бондаренко Н.В. Рациональное расположение распыливающих устройств при локализации пожара в горной выработке // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2013. – Вып. 50. – С. 115 – 121.

Yushchenko, Yu.N., Kolyada, A.Yu., Bondarenko, N.V. (2013). *Ratsional'noye raspolozheniye raspylivayushchikh ustroystv pri lokalizatsii pozhara v gornoй vyrabotke* [The rational location of sprayer units by localization of a fire in a mine working]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, Ukraine, issue 50, pp. 115 – 121.

3. Гурьев Ю.В., Ткаченко И.В., Еремин Ю.С. Анализ методов компьютерного моделирования процесса распыления из оросителя тонкораспыленной воды // Пожаровзрывобезопасность. – 2012. – Т. 21, № 10. – С. 77 – 80.

Gur'ev, Yu.V., Tkachenko, I.V., Yeryemin, Yu.S. *Analiz metodov komp'yuternogo modelirovaniya protsessa raspyleniya iz orositelya tonkoraspylyennoy vody* [Analysis of methods of the computer simulation of the atomization process using the fine-dispersed water sprayer]. *Pozharovzryvobesopasnost* [Fire-explosion safety], 2012, vol. 21, no. 10, pp. 77 – 80.

4. Гурьев Ю.В., Еремин Ю.С. Использование методов численного моделирования в проектировании оросителей автоматических установок пожаротушения // Пожаровзрывобезопасность – 2013. – Т. 22, № 2. – С. 78 – 84.

Gur'ev, Yu.V., Yeryemin, Yu.S. *Ispol'zovaniye metodov chislennogo modelirovaniya v proyektirovanii orositeley avtomaticheskikh ustanovok pozharotusheniya* [Use of computational modeling methods in the design of sprinklers of automatic fire-extinguishing installations]. *Pozharovzryvobesopasnost* [Fire-explosion safety], 2013, vol. 22, no. 2, pp. 78 – 84.

5. Волков Р.С., Кузнецов Г.В., Еремин Ю.С. Экспериментальное исследование полноты испарения распыленной воды при её движении через пламя // Пожаровзрывобезопасность. – 2013. – Т. 22, № 10. – С.15 – 20.

Volkov, R.S., Kuznetsov, G.V., Yeryemin, Yu.S. *Eksperimental'noye issledovaniye polnoty ispareniya raspylyennoy vody pri yeye dvizhenii cherez plamya* [The experimental investigation of completeness of vaporization of the sprayed water by its motion through the flame]. *Pozharovzryvobesopasnost* [Fire-explosion safety], 2013, vol. 22, no. 10, pp. 15 – 20.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.  
Дата поступления рукописи 14.03.2016

*Andrey Yur'yevich Kolyada*, head of department; e-mail: [kolyada1980@ukr.net](mailto:kolyada1980@ukr.net);  
the “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;  
283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phones (+38 062) 311-10-84; 311-39-70

## EXPERIMENTAL DETERMINATION OF PARAMETERS OF LOCALIZATION OF UNDERGROUND FIRES WITH WATER CURTAINS

**Purpose.** To confirm correctness of the theoretical determination of the metering characteristic of a water sprayer, that one of the coefficient of distribution of the fine-dispersed water in the space of a mine working and that one of placement of the sprayers in the cross-section of the mine working.

**Methods.** Experimental investigations.

**Results.** The metering characteristic of the sprayer and the water distribution coefficient are determined.

**Scientific novelty.** The determination of the distribution coefficient and its taking into account permit to raise accuracy of calculation of parameters for localization of the underground fires.

**Practical value.** Enhancement of reliability and effectiveness of the water curtains used for localization of the underground fires.

**Keywords:** *localization; sprayer; metering characteristic; discharge coefficient; water distribution coefficient; water curtain.*

**УДК [614.843.2:648.336.2]:001.891.573**

*Андрей Васильевич Осадчий, замнач. отд.; e-mail: [osad4iy58@mail.ru](mailto:osad4iy58@mail.ru);*

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

*Владислав Геннадьевич Турчанин, инж.-конструктор 1-й кат.; e-mail: [turchanin\\_v@ukr.net](mailto:turchanin_v@ukr.net);*

*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*

**ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВКИ ДЛЯ СУШКИ ПОЖАРНЫХ РУКАВОВ**

**Цель.** Обоснование параметров разработанного устройства для сушки пожарных рукавов.

**Методика.** Графоаналитический метод расчета процесса сушки.

**Результаты.** С использованием экспериментальных данных получены значения основных параметров установки – расхода воздуха и количества теплоты.

**Практическая значимость.** Рассчитанные параметры позволяют разработать и изготовить опытный образец установки для сушки пожарных рукавов.

**Ключевые слова:** *пожарный рукав; сушка; влажность; энтальпия; расход воздуха; количество теплоты.*

**Постановка проблемы.** Круг задач, решаемых пожарно-спасательными подразделениями МЧС ДНР, постоянно расширяется, что требует адекватного повышения функциональных возможностей пожарной техники.

Особую роль в ликвидации пожаров выполняют пожарные рукава. В номенклатуре пожарно-технического вооружения пожарные рукава по удельному весу занимают первое место, а на пожарах используются значительно чаще, чем другие виды пожарного оборудования. При этом 85 % отказов пожарной техники приходится на долю пожарных рукавов. Поэтому обеспеченность пожарно-спасательных подразделений пожарными рукавами и их техническое состояние в значительной степени определяют готовность и оперативность подразделений МЧС ДНР.

Проведенный анализ эксплуатации и обслуживания рукавного хозяйства пожарно-спасательных подразделений показал, что основная часть обслуживания (по затратам времени, трудовых и материальных ресурсов) – процесс сушки рукавов после их целевого использования. Применяемое при этом оборудование является стационарным, громоздким и требует специальных сооружений (рукавных башен), оснастки и т.д.

Ситуация затрудняется при ликвидации сложных и удаленных пожаров, когда отсутствует возможность доставки пожарных рукавов в пожарно-спасательные подразделения для сушки.

Все это делает актуальной задачу разработки малогабаритной, удобной в эксплуатации сушильной установки, которую можно использовать непосредственно на пожарах, а также теоретического и экспериментального обоснования её параметров.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Общие вопросы теории сушки изложены в работе [1]. Об обслуживании пожарной техники, в том числе пожарных рукавов, речь идет в монографии [2]. В статье [3] предложены организационно-технические решения по модернизации башенных сушилок в Беларуси.

Работы М.А. Елфимовой [4 – 7] посвящены анализу методов и способов технического обслуживания напорных рукавов, разработке математической модели процесса сушки и мобильного комплекса термовакуумной сушки пожарных рукавов. Основы термовакуумной сушки изложены в работе [8]. В статье [9] описаны экспериментальные исследования процесса сушки пожарных рукавов пожарных автомобилей.

Однако вопрос совершенствования технического обслуживания пожарных рукавов остается недостаточно исследованным.

**Материалы и результаты исследований.** Сконструирована установка компактная для сушки пожарных рукавов (рис.1).

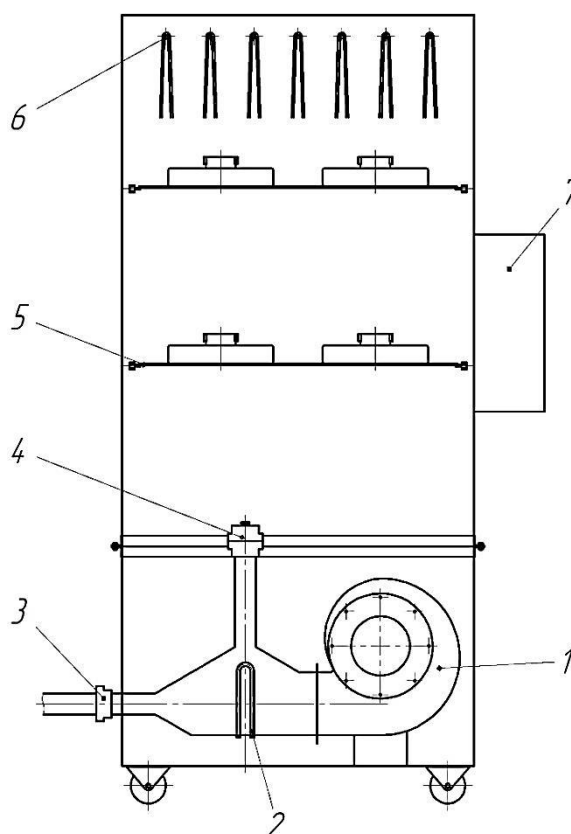


Рис. 1. Установка компактная для сушки пожарных рукавов УКСПР:

1 – центробежный вентилятор; 2 – ТЭН; 3 – выход для сушки внутренней поверхности пожарных рукавов; 4 – выход для сушки наружной поверхности пожарных рукавов; 5 – полки для сушки пожарных рукавов в скатках; 6 – штыри для сушки пожарных рукавов в развешенном состоянии; 7 – блок управления

УКСПР состоит из термовентиляционного блока, распределительного модуля и сушильного шкафа. В состав термовентиляционного блока входят электровентилятор, электронагреватель с терморегулятором и реле времени.

Распределительный модуль поставляют на колесных парах для удобства перемещения УКСПР. На боковой стенке модуля расположены патрубки для сушки и талькирования внутренней поверхности пожарных рукавов. Распределительный модуль имеет два режима работы:

- сушка наружной поверхности пожарных рукавов;
- сушка и талькирование внутренней поверхности пожарных рукавов.

Сушильный шкаф имеет приспособление для сушки пожарных рукавов в подвешенном состоянии и скатках. Можно одновременно обслуживать четыре рукава.

Проведем расчет основных параметров разработанного конвективного сушильного устройства по стандартной процедуре [1]. Принимаем следующие исходные данные. Сушат напорные пожарные рукава длиной 20 м, внутренним диаметром 77 мм, латексированные, с каркасом из синтетических (высокопрочных полиэфирных) нитей. Согласно экспериментальным данным, приведенным в работе [1]:

- масса мокрого пожарного рукава  $m_M = 12,12$  кг;
- масса сухого пожарного рукава  $m_C = 10,13$  кг;
- масса пересушенного рукава  $m_{пер} = 9,715$  кг.

Таким образом, начальная влажность материала пожарного рукава

$$\omega_1 = \frac{m_M - m_{пер}}{m_M} \cdot 100 = 19,85 \%,$$

конечная влажность материала пожарного рукава

$$\omega_2 = \frac{m_C - m_{пер}}{m_C} \cdot 100 = 4,1 \%.$$

По данным [4], оптимальные параметры сушки:

- время сушки  $\tau_c = 2$  ч = 7200 с;
- температура сушильного агента (воздуха)  $t_1 = 50$  °С.

Теплоемкость материала рукавов  $C_M = 1130$  Дж/(кг·К).

Принимаем, что в сушильном устройстве одновременно высушивается  $N = 4$  пожарных рукава.

Принимаем, что на выходе из сушильного устройства воздух имеет относительную влажность  $\phi = 80$  %, а теплотери в окружающую среду в устройстве составляют 10 % от расхода теплоты на нагревание пожарных рукавов.

Общее количество удаляемой влаги равно

$$W_{об} = N (m_m - m_c) = 7,96 \text{ кг};$$

в единицу времени

$$W = W_{об} / \tau_c = 3,98 \text{ кг/ч} = 0,0011 \text{ кг/с}.$$

Условный расход высушиваемого материала  $G$ , кг/ч:

$$G_1 = \frac{Nm_m}{\tau_c} = 24,24 \text{ кг/ч}.$$

Принимаем, что пожарные рукава загружают в сушильное устройство при начальной влажности  $\omega_1 = 19,84 \%$  и температуре  $\theta_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , высушивают их до конечной влажности  $\omega_2 = 4,27 \%$  и удаляют из сушильного устройства при температуре  $\theta_2 = 35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Производительность устройства по высушенным рукавам

$$G_2 = G_1 - W = 20,26 \text{ кг/ч}.$$

Удельный расход теплоты на нагревание пожарных рукавов

$$q_m = \frac{G_2 C_m (\theta_2 - \theta_1)}{W} = 143941 \text{ Дж/кг}.$$

Потери теплоты в окружающую среду  $q_{п} = 0,1 q_m = 14394 \text{ Дж/кг}$ .

Теплота, подводимая в сушильную установку, расходуется в общем случае следующим образом:

- потери теплоты с уходящим сушильным агентом (воздухом);
- потери теплоты на испарение влаги из высушиваемого материала;
- потери теплоты на нагревание высушиваемого материала;
- потери теплоты на нагревание транспортирующих устройств;
- потери теплоты в окружающую среду.

В проектируемом устройстве транспортирующие устройства отсутствуют и не производится дополнительный подвод теплоты.

Тогда невязка теплового баланса устройства составит

$$\Delta = C_b \theta_1 - (q_m + q_{п}) = 4190 \cdot 10 - (143941 + 14394) = -116435 \text{ Дж/кг}.$$

где  $C_b$  – теплоемкость воды;  $C_b = 4190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ .

Дальнейший расчет проводим отдельно для летних и зимних условий.

**Летние условия.** Средние параметры атмосферного воздуха для Донецка: температура  $t_0 = 22,2$  °С; относительная влажность  $\varphi_0 = 70$  %.

На  $I-d$  диаграмме влажного воздуха (рис. 2) находим точку  $A$ , характеризующую состояние наружного воздуха:

- массовая доля влаги (количество влаги, г, на 1 кг воздуха)  $d_0 = 11,2$ ;
- энтальпия  $I_0 = 50$  кДж/кг.

Проводим из точки  $A$  вертикаль  $d_0 = \text{const}$  до пересечения с изотермой ( $t_1 = 50$  °С) в точке  $B$ , характеризующей состояние воздуха на входе в сушильную камеру:

$$d_1 = d_0 = 11,2;$$

$$I_1 = 78 \text{ кДж/кг.}$$

Из точки  $B$  проводим линию, характеризующую теоретический процесс сушки ( $I_1 = \text{const}$ ). На этой линии берем произвольную точку  $e$  и проводим из неё горизонталь до пересечения в точке  $f$  с линией  $d_1 = d_0 = \text{const}$ .

Находим длину отрезка  $ef = 18$  мм.

Отношение масштабов диаграммы  $m = m_I / m_d = 300$ ,

где  $m_I$  – масштаб диаграммы по оси энтальпий;  $m_I = 0,075$  кДж/(кг·мм);

$m_d$  – масштаб диаграммы по оси, характеризующей массовую долю влаги,  $m_d = 0,0025$  мм<sup>-1</sup>.

Длина отрезка  $eC$  равна

$$eC = ef \frac{\Delta}{m} = 7,0 \text{ мм.}$$

Откладываем отрезок  $eC$  из точки  $e$  вниз (так как  $\Delta < 0$ ) и через точки  $B$  и  $C$  проводим прямую до пересечения с линией  $\varphi = 80$  % в точке  $D$ , которая характеризует состояние воздуха на выходе из сушильного устройства:

$$d_2 = 18; \quad I_2 = 74 \text{ кДж/кг.}$$

Определяем удельный расход воздуха  $l_{\text{лет}}$ :

$$l_{\text{лет}} = \frac{1}{d_2 - d_0} = 147.$$

Массовый расход воздуха на сушку  $L_{\text{лет}}$ :

$$L_{\text{лет}} = l_{\text{лет}} W = 585 \text{ кг/ч,}$$

а объемный расход  $L_{\text{лет}}^{\text{об}} = \frac{L_{\text{лет}}}{\rho_{\text{в}}} = 0,163 \text{ м}^3/\text{с,}$

где  $\rho_{\text{в}}$  – плотность воздуха;  $\rho_{\text{в}} = 1,29$  кг/м<sup>3</sup>.



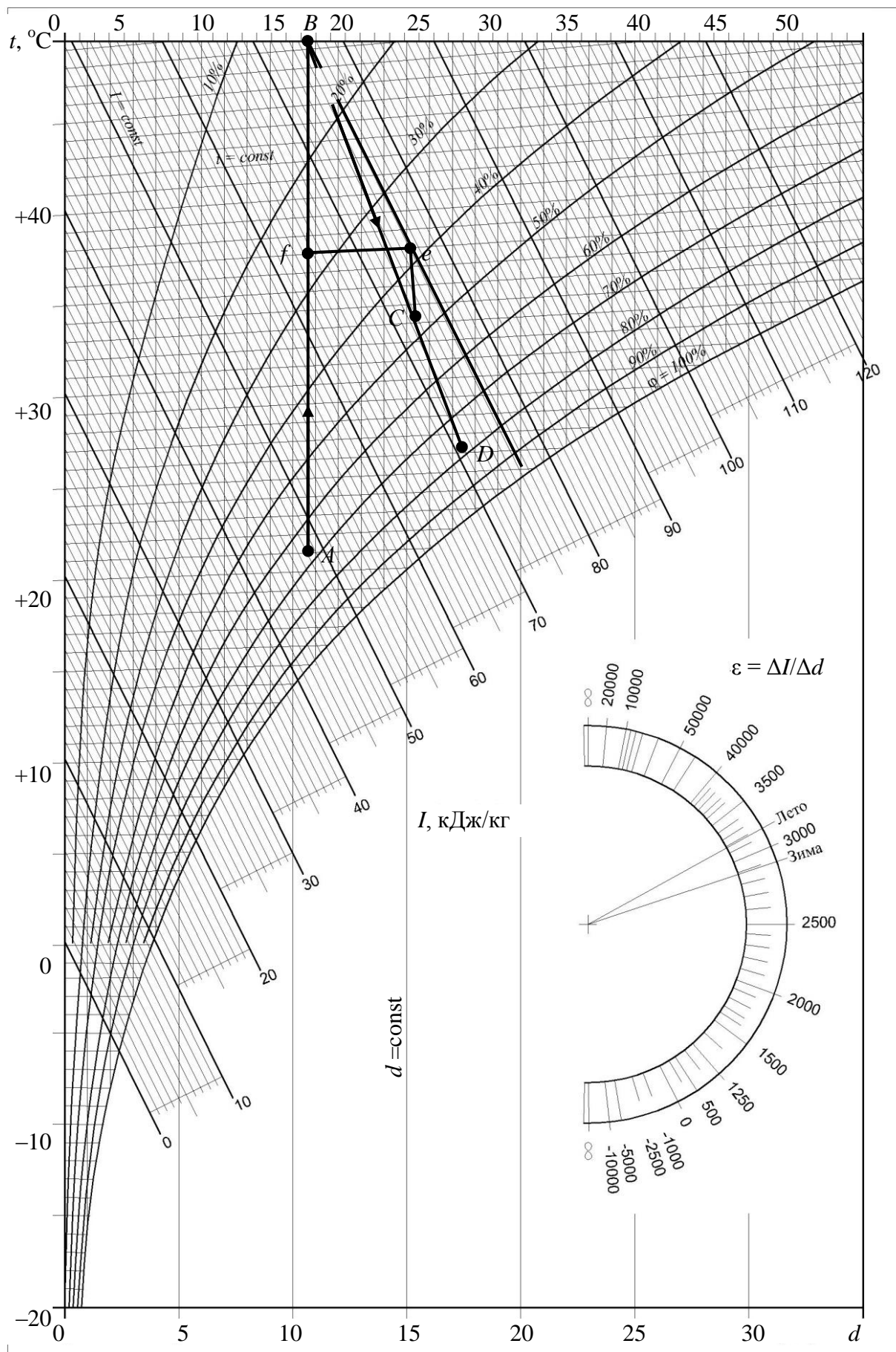


Рис. 2. Процесс сушки

Удельный расход теплоты на нагревание воздуха в калорифере  $q$ , кДж/кг:

$$q_{\text{лет}} = l(I_1 - I_2) = 4116 \text{ кДж/кг.}$$

Расход теплоты  $Q_{\text{лет}}$ , кВт/ч, на сушку равен

$$Q_{\text{лет}} = qW = 16382 \text{ кДж/ч} = 4,55 \text{ кВт.}$$

**Зимние условия.** Параметры наружного воздуха в зимних условиях  $t_0 = -6,0 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $I_0 = 88 \text{ \%}$ .

На  $I-d$  диаграмме состояние воздуха характеризуется точкой  $A$ :

$$d_0 = 2,4; I_0 = -2 \text{ кДж/кг.}$$

Проводим аналогичное предыдущему построение (на рис. 2 не показано) и получаем  $d_2 = 11$ ;  $I_2 = 49 \text{ кДж/кг.}$

Рассчитываем

$$l_{\text{зим}} = \frac{1}{d_2 - d_0} = 116;$$

$$L_{\text{зим}} = l_{\text{зим}}W = 463 \text{ кг/ч} = 0,129 \text{ кг/с};$$

$$L_{\text{зим}}^{\text{об}} = \frac{L_{\text{зим}}}{\rho_{\text{в}}} = 0,1 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$q_{\text{зим}} = l_{\text{зим}}(I_1 - I_0) = 6032 \text{ кДж/кг};$$

$$Q_{\text{зим}} = q_{\text{зим}}W = 24007 \text{ кДж/ч} = 6,67 \text{ кДж/с} = 6,67 \text{ кВт.}$$

Расход теплоты в зимних условиях больше, чем в летних. Расход воздуха в летних условиях больше, чем в зимних.

## Выводы

1. Разработано компактное устройство для конвективной сушки пожарных рукавов.
2. Рассчитаны основные параметры сушильного устройства: расходы сушильного агента (воздуха) и теплоты.

## Список литературы / References

1. Баранов Д.А., Кутенов А.М. Процессы и аппараты. – М.: Академия, 2004. – 404 с.  
Baranov, D.A., Kutenov, A.M. (2004). *Protsessy i apparaty* [Processes and apparatus]. Moscow: Akademiya Publ., Russia, 404 p.
2. Безбородько М.Д. Пожарная техника. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2004. – 550 с.  
Bezborod'ko, M.D. (2004). *Pozharnaya tekhnika* [Fire engineering]. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, Russia, 550 p.
3. Копытков В.В. Модернизация башенной сушилки // Вестник Кокшетаутского технического ин-та М-ва по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан. – Кокшетау: КТИ МЧС РК, 2012. – № 3 (7). – С. 27 – 29.  
Kopytkov, V.V. (2012). *Modernizatsiya bashennoy sushilki* [Reconstruction of the drying tower]. *Vestnik Kokshetautskogo tekhnicheskogo instituta Ministerstva po chrezvychaynym situatsiyam Respubliki Kazakhstan* [Bulletin of the Kokshetau Technical Institute of the Ministry of Emergency Situations (Kazakhstan)]. Kokshetau: KTI MChS RK, Kazakhstan, no. 3 (7), pp. 27 – 29.
4. Елфимова М.В. Разработка мобильного комплекса по оперативному восстановлению готовности пожарных подразделений за счет тепловакуумной сушки рукавов: дис. канд. техн. наук. – СПб., 2013. – 219 с.  
Yelfimova, M.V. (2013). *Razrabotka mobil'nogo kompleksa po operativnomu vosstanovleniyu gotovnosti pozharnykh podrazdeleniy za schyet teplovakuumnoy sushki rukavov*. Diss. cand. tekhn. nauk [Development of the mobile complex on the operative restoration of readiness of fire sub-units at the expense of the heat-vacuum drying of the hoses. Cand. techn. sci. diss.]. St. Petersburg, Russia, 219 p.
5. Елфимова М.В., Архипов Г.Ф. Актуальные проблемы обслуживания пожарных рукавов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2011. – № 3 (19). – С. 35 – 40.  
Yelfimova, M.V., Arkhipov, G.F. *Aktual'nyye problemy obsluzhivaniya pozharnykh rukavov* [Topical problems of servicing the fire hoses]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere* [Problems of risk management in the technosphere], 2011, no. 3 (19), pp. 35 – 40.
6. Елфимова М.В. Обслуживание пожарных рукавов // Вестник Восточно-Сибирского ин-та МВД России. – Томск, 2010. – № 3 (54). – С. 55 – 61.  
Yelfimova, M.V. (2010). *Obsluzhivaniye pozharnykh rukavov* [Servicing the fire hoses]. *Vestnik Vostochno-Sibirskogo instituta MVD Rossii* [Bulletin of the East Siberian Institute of the Ministry of Internal Affairs (Russia)]. Tomsk, Russia, no. 3 (54), pp. 55 – 61.
7. Елфимова М.В., Носенков А.А. О проблеме обеспечения эффективности эксплуатации напорных рукавов пожарных автомобилей в современных условиях // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 14 – 17.

Yelfimova, M.V., Nosenkov, A.A. *O probleme obespecheniya effektivnosti ekspluatatsii napornykh rukavov pozharnykh avtomobiley v sovremennykh usloviyakh* [About the problem of ensuring the efficiency of operation of pressure hoses of fire-fighting vehicles under present-day conditions]. *Nadzornaya deyatelnost i sudebnaya ekspertiza v sisteme bezopasnosti* [Supervision activity and legal expertise in the security system], 2011, vol. 1, no 1, pp. 14 – 17.

8. Дэшман С. Научные основы вакуумной техники: пер. с англ. – М.: Академия, 2004. – 404 с.

Dashman, S. (2004). *Nauchnyye osnovy vakuumnoy tekhniki: per. s angl.* [Scientific basis of the vacuum technology: transl. from English]. Moscow: Akademiya Publ., Russia, 404 p.

9. Безрукова Ю.П., Елфимова М.В. Тепловакуумная сушка напорных рукавов пожарных автомобилей // Чрезвычайные ситуации: теория и практика: материалы международной науч.-практической конф. курсантов, студентов и слушателей. – Гомель: ГТТУ им. П.О. Сухого, 2013. – С. 210 – 214.

Bezrukova, Yu.P., Yelfimova, M.V. (2013). *Teplovakuumnaya sushka napornykh rukavov pozharnykh avtomobiley* [Heat-vacuum drying the pressure hoses of firefighting vehicles]. *Chrezvychaynyye situatsii: teoriya i praktika: materialy mezhdunarodnoy nauch.-prakticheskoye konf. kursantov, studentov i slushateley* [Emergency situations: theory and practice: Materials of the International theoretical and practical conference of military students, students and cadets]. Homyel': GTTU im. P.O. Sykhogo Press, Belarus, pp. 210 – 214.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.  
Дата поступления рукописи 01.03.2016

*Andrey Vasil'yevich Osadchiy*, deputy head of department; e-mail: [osad4iy58@mail.ru](mailto:osad4iy58@mail.ru);

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

*Vladislav Gennad'yevich Turchanin*, development engineer of first category; e-mail: [turchanin\\_v@ukr.net](mailto:turchanin_v@ukr.net);  
the "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;

283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38 062) 311-39-70

## PARAMETERS OF AN INSTALLATION FOR DRYING THE FIRE HOSES

**Purpose.** Substantiation of the parameters of the device for drying the fire hoses worked out.

**Methods.** Graph-analytic method of calculation of the drying process.

**Results.** The values of the principal parameters of the installation, i.e. air consumption and heat quantity, were received with the use of experimental data.

**Practical value.** The parameters calculated permit to work out and to manufacture the experimental model of the installation for drying the fire hoses.

**Keywords:** fire hose; drying; humidity; enthalpy; air consumption; heat quantity.

## II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [622.647.2-418-036:614.841.12]:001.891.573

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

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

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛАХ ПРИ НАГРЕВАНИИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМ ВОЗДУШНЫМ ПОТОКОМ

**Цель.** Разработать математическую модель нестационарных теплообменных процессов в твердых материалах при нагревании их высокотемпературным воздушным потоком для установления зависимости температуры воспламенения материала и времени индукции в горной выработке.

**Методы.** Использование законов термодинамики и теплообмена для исследования процессов нагревания воздушным потоком резинотехнических и синтетических материалов.

**Результаты.** Разработана математическая модель нестационарного теплообмена высокотемпературного воздушного потока при ламинарном режиме обтекания твердого тела, а также установлены зависимости для расчета температуры воспламенения материала и времени индукции.

**Научная новизна.** Впервые в результате теоретических исследований получены зависимости температуры воспламенения материала и времени индукции от теплофизических параметров системы воздушный поток – твердый материал для условий горной выработки.

**Ключевые слова:** *моделирование; термодинамика; твердые материалы; температура воспламенения; время индукции; воздушный поток; горная выработка.*

**Постановка проблемы.** Современные угольные шахты представляют собой высокомеханизированные предприятия с развитой электрической сетью и большим количеством машин и механизмов, эксплуатация которых имеет специфические особенности, повышающие опасность их использования, а именно: непрерывное подвигание фронта работ требует перемещения оборудования и наращивания электросетей, при этом работы необходимо выполнять в стесненном пространстве с возможными обрушениями, обвалами, выделением метана, образованием опасных тепловых импульсов.

Широкое применение в горных выработках шахт резинотехнических и синтетических материалов и изделий, в частности конвейерных лент, вентиляционных труб, гибких электрических кабелей, в сочетании с углем и метаном потенциально повышают уровень пожарной опасности подземных объектов, создают горючую среду, способную воспламениться даже от кратковременного действия маломощных тепловых источников.

Температурные показатели твердых материалов определяют в лабораторных условиях, не моделирующих их эксплуатацию в проветриваемых горных выработках. Однако известно, что температура воспламенения материала не является величиной постоянной, а зависит от условий, в которых он применяется.

В связи с этим представляют научный интерес и актуальны теоретические исследования термодинамических процессов в твердом материале при нагревании его высокотемпературным воздушным потоком и определение зависимости температуры воспламенения и времени индукции в условиях, близких к условиям в горной выработке.

**Изложение основного материала исследований.** Резинотехнические и синтетические материалы имеют низкий коэффициент теплопроводности, что при взаимодействии с высокотемпературным воздушным потоком приводит к аккумуляции в них теплоты и протеканию экзотермической реакции разложения в некотором поверхностном слое. Это способствует повышению температуры нагреваемой поверхности, вследствие чего возрастает скорость термодеструкции материала. За счет конвективного подвода теплоты поверхность претерпевает значительные физико-химические изменения, происходит ряд последовательных и параллельных химических реакций и образуются продукты разложения: горючие и негорючие газы, твердые остатки. Газообразные вещества смешиваются с окружающим воздухом и, если удовлетворяются критические условия горения комплексной системы, образуют горючую среду. При наличии в материалах антипиренов (что является характерным для материалов, применяемых в угольных шахтах) образование горючей газовой смеси затруднено. При возникновении источника зажигания (искры, участка местного перегрева и др.) горючая среда воспламеняется и начинает гореть в момент, когда температура нагревания достаточна для воспламенения. Если условия для воспламенения неблагоприятны, то твердые горючие материалы окисляются под воздействием набегающего воздушного потока, выделяют теплоту, тлеют или обугливаются.

Проведенные на дериватографе исследования кинетики процесса термической деструкции и внутренних процессов, происходящих при нагревании резинотехнических материалов для шахт, позволили установить температурный диапазон процесса термодеструкции каждого материала, зависимость потери массы от температуры. По изменению кривой дифференциального анализа можно судить о наличии экзотермического эффекта реакции.

При обтекании материала тепловым воздушным потоком распределение температуры около нагретой поверхности материала обладает особенностями, характерными для пограничного слоя: изменение температуры будет наблюдаться только в непосредственной близости от поверхности. За пределами этого слоя изменение температуры потока будет незначительным.

Химическая реакция между твердым материалом и кислородом протекает в несколько этапов. Сначала кислород диффундирует через пограничный слой к поверхности материала. При низких температурах поверхности определяющим процессом является химическая реакция между кислородом и углеродом. Этот начальный режим окисления является кинетическим и описывается законом Аррениуса. Кинетический режим теплообмена, соответствующий кинетическому режиму протекания гетерогенной реакции, реализуется при малых значениях времени  $t < t_*$ , ( $t_*$  – время воспламенения материала). Следующий этап – десорбция продуктов реакции с поверхности и диффузия этих продуктов через пограничный слой. В результате одновременного протекания этих процессов имеет место определенное распределение концентрации продуктов сгорания и кислорода у поверхности материала, которое тесно связано с условиями процесса.

При достаточно больших значениях времени  $t > t_*$  реализуется диффузионный режим теплообмена, отвечающий диффузионному режиму протекания гетерогенных реакций. Он характеризуется тем, что скорость реакции велика и скорость процесса определяет скорость подвода кислорода. Смена кинетического режима протекания реакции диффузионным имеет место в случае воспламенения реагирующей системы. Время воспламенения устанавливается из условия перегиба температурной кривой поверхности материала  $T_w(t)$ . Скорость реакции в целом определяется скоростью самого медленного из элементарных процессов. Порядок реакции, протекающей на поверхности, равен единице, так как согласно основному закону химической кинетики скорость гетерогенного химического процесса прямо пропорциональна поверхностной концентрации веществ в первой степени [1].

Таким образом, если в системе протекает экзотермическая реакция с большой энергией активации, то могут создаться условия, при которых выделяемая теплота накапливается в системе и приводит к быстрому нарастанию скорости реакции и температуры. Тепловое равновесие между реагирующей системой и окружающей средой становится невозможным и происходит воспламенение, которое сопровождается выделением теплоты и света.

Несмотря на то, что проведены многие экспериментальные исследования процесса воспламенения синтетических материалов под действием излучения или высокотемпературного потока и выполнены теоретические исследования воспламенения твердых тел с учетом разложения и диффузии высокополимерных веществ, до настоящего времени механизм этого явления продолжает оставаться не вполне ясным. Остается нерешенным вопрос, при каких условиях возникает воспламенение твердых материалов. Основываясь на полученных результатах экспериментальных исследований, можно сказать, что критические условия возникают в момент, когда температура поверхности твердого материала достигает определенного значения, характерного для

данного материала. Это позволяет объяснить взаимосвязь между физическим смыслом температуры воспламенения и термическими свойствами материала.

Таким образом, практический интерес представляет определение температуры воспламенения материала, температуры поверхности материала в момент его воспламенения, когда скорость выхода летучих из материала будет достаточной для образования горючей среды.

Для описания процессов взаимодействия теплового потока и материала можно воспользоваться уравнениями пограничного слоя для газа. Считаем, что поверхность материала является плоской и горизонтальной. Процесс взаимодействия воздушного потока и плоской пластины описывает следующая система дифференциальных уравнений [2 – 4]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho(\bar{w} \nabla) \bar{w} = \mu \nabla^2 \bar{w}; \\ \operatorname{div} \bar{w} = 0; \\ \rho(\bar{w} \nabla) T = \frac{\mu}{\operatorname{Pr}} \nabla^2 T; \\ c_{ps} \rho_s \frac{dT_s}{dt} = \operatorname{div}(\lambda_s \nabla T_s), \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \\ (4) \end{array}$$

где  $\rho$ ,  $\rho_s$  – плотность потока и твердого материала соответственно,  $\text{кг/м}^3$ ;

$\bar{w}$  – вектор скорости потока;

$T$ ,  $T_s$  – температура потока и твердого материала соответственно,  $\text{К}$ ;

$\operatorname{Pr}$  – число Прандтля;

$\mu$  – динамическая вязкость,  $\text{Н}\cdot\text{с/м}^2$ ;

$c_{ps}$  – удельная теплоемкость,  $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;

$t$  – время,  $\text{с}$ ;

$\lambda_s$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;

$\nabla^2$  – оператор Лапласа.

Этими уравнениями являются уравнения теплового ламинарного пограничного слоя (1) – (3) и уравнение нестационарной теплопроводности для твердого материала (4).

Поскольку при возникновении воспламенения процесс разложения материала ускоряется под действием образующейся теплоты, происходит также воспламенение и горение газообразной смеси. При этом возникшее пламя передает часть своей теплоты к еще не воспламенившемуся участку материала, завершая цикл горения. Так как горючий материал еще присутствует, то рассматриваемый процесс продолжается. При попадании в воздух негорючие



продукты термического разложения охлаждаются и улетучиваются в виде дыма.

Решение системы дифференциальных уравнений (1) – (4) в такой сложной сопряженной постановке с учетом неоднородности протекания большинства процессов затруднительно с математической точки зрения. Тем не менее практическая важность решения этой проблемы стимулировала появление за последние годы большого количества теоретических и экспериментальных исследований в направлении выяснения главных факторов, влияющих на процессы взаимодействия нагретого газа и материала.

Для построения упрощенной математической модели процессов нагревания и воспламенения материала в проветриваемых выработках, определения температуры воспламенения примем ряд допущений, не искажающих физической картины нагревания тепловым воздушным потоком плоской поверхности материала.

Скорость воздушного потока в горных выработках относительно невелика. Поэтому воздушный поток можно считать несжимаемой средой. Стенки горной выработки имеют различную шероховатость и течение воздушного потока, как правило, является турбулентным. Однако в нем всегда можно выделить слой, непосредственно примыкающий к поверхности материала, в котором течение можно считать ламинарным. Большинство резинотехнических и синтетических материалов, применяемых в горных выработках угольных шахт, – композиционные, причем при нагревании их отдельные компоненты могут претерпевать ряд физико-химических превращений еще до выхода на поверхность. Считаем, что исследуемые материалы являются однородными с постоянными теплофизическими коэффициентами, а тепловые эффекты внутренних физико-химических превращений входят в тепловой баланс наравне с тепловыми эффектами реакций на поверхности независимо от глубины залегания соответствующих фронтов реакций.

Вследствие относительно малой теплопроводности материалы аккумулируют значительное количество теплоты в поверхностном слое. Такой слой иногда называют реакционным. Принятое допущение правомерно, когда глубина прогревания или расстояние по нормали к поверхности, на котором срабатывает перепад температур, существенно меньше расстояния вдоль поверхности, на котором происходит такое же изменение температуры. На поверхности раздела твердой и газовой фаз по закону Аррениуса происходит химическая гетерогенная реакция первого порядка, то есть скорость ее пропорциональна первой степени объемной концентрации кислорода на поверхности. Для начальной стадии протекания гетерогенной реакции термоокислительной деструкции материала считаем, что концентрация кислорода на поверхности существенно не отличается от концентрации его в воздухе нормального состава и достаточна для протекания реакции, а

концентрация выделяющихся горючих продуктов достаточна для их воспламенения.

При математическом описании процессов горения на поверхности необходимо учесть, что уравнения теплопереноса, записанные для обеих фаз, не содержат в этом случае экспоненциальных членов. Все нелинейности, присущие задачам горения в этом случае, оказываются сосредоточенными в граничных условиях, записанных для фронта гетерогенной реакции.

С учетом вышеприведенных предположений математическая модель процесса нагревания материала при обтекании плоской поверхности высокотемпературным воздушным потоком в кинетическом режиме теплообмена имеет вид

$$\rho \left( u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (6)$$

$$\rho \left( u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \frac{\mu}{Pr} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}; \quad (7)$$

$$c_{ps} \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = \lambda_s \frac{\partial^2 T_s}{\partial y^2}. \quad (8)$$

Уравнения (5), (6) характеризуют гидродинамику воздушного потока, при этом поле скоростей не зависит от температурного поля. Поэтому можно сначала решить эти уравнения, а полученный результат использовать для определения температурного поля в пограничном слое.

Начальные и граничные условия для уравнений (5) – (8) имеют вид

$$t = t_0; \quad T_s = T_0; \quad (9)$$

$$y = 0; \quad u = v = 0; \quad (10)$$

$$T = T_s = T_w; \quad (11)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial y} - \lambda_s \frac{\partial T_s}{\partial y} = -q\omega, \quad (12)$$

где  $u$ ,  $v$  – проекции вектора скорости потока на оси  $x$ ,  $y$  соответственно, м/с;  
 $\omega$  – скорость химической реакции, кг/(м<sup>2</sup>·с);

$$\omega = \rho C k_0 \exp \left( -\frac{E}{RT_w} \right); \quad (13)$$

- $C$  – объемная доля кислорода;  
 $k_0$  – предэкспоненциальный множитель, м/с;  
 $E$  – энергия активации, кДж/моль;  
 $R$  – универсальная газовая постоянная, кДж/(моль·К);  
 $q$  – тепловой эффект реакции, кДж/кг;  
 $s, w$  – индексы, относящиеся к твердой фазе и поверхности.

Условие (12) выражает баланс теплоты на поверхности материала с учетом физико-химических превращений.

При

$$y \rightarrow \infty; \quad u = u_{\text{п}}; \quad v = 0; \quad (14)$$

$$T = T_{\text{п}}; \quad (15)$$

$$y \rightarrow -\infty; \quad \frac{\partial T_s}{\partial y} = 0. \quad (16)$$

Для решения уравнения теплового ламинарного газового потока используют переменные Блазиуса:

$$\eta = y \sqrt{\frac{u_{\text{п}}}{\nu x}}; \quad \Psi = f(\eta) \sqrt{\nu x u_{\text{п}}}. \quad (17)$$

После необходимых преобразований распределение температуры в пограничном слое имеет вид

$$\theta = \theta_w + (\theta_{\text{п}} - \theta_w) \frac{\int_0^{\eta} \left[ \frac{f''(\eta)}{f''(0)} \right]^{\text{Pr}} d\eta}{\int_0^{\infty} \left[ \frac{f''(\eta)}{f''(0)} \right]^{\text{Pr}} d\eta}. \quad (18)$$

Представим краевую задачу для твердой фазы в безразмерном виде. Воспользуемся следующим представлением переменных величин:

$$y_s = \frac{y}{r_0} \sqrt{\frac{a}{a_s}}; \quad \tau = \frac{t}{t_0}; \quad \theta_s = \frac{T_s - T_{w_0}}{RT_{w_0}^2} E, \quad (19)$$

$$\text{где } r_0 = \frac{\lambda RT_{w_0}^3 \exp(E/RT_{w_0})}{k_0 q E c_p T_{\text{п}}}; \quad t_0 = \frac{r_0^2 \rho c_p}{\lambda};$$

$a, a_s$  – коэффициенты температуропроводности воздуха и твердого материала соответственно, м<sup>2</sup>/с.

Воспользуемся также преобразованием Д.А. Франк-Каменецкого [5] для константы скорости химической реакции:

$$k = k_0 \exp(-E/RT_w) = \exp(-E/RT_{w0}) \exp\left(\frac{\theta_w}{1+\beta\theta_w}\right),$$

где  $\beta = \frac{RT_w}{E}$ .

Тогда краевая задача для твердого материала в безразмерном виде имеет вид

$$\frac{\partial \theta_s}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \theta_s}{\partial y_s^2}; \quad (20)$$

$$\theta_s|_{\tau=0} = \theta_{s0}; \quad (21)$$

$$\theta_s|_{y_s=0} = \theta_w; \quad \frac{\partial \theta_s}{\partial y_s}|_{y_s \rightarrow \infty} = 0, \quad (22)$$

а условие сопряжения (12) преобразуется к следующему виду:

$$\frac{1}{\sqrt{x}} \frac{d\theta}{d\eta} \Big|_{\eta=0} - \kappa_\varepsilon \frac{\partial \theta_s}{\partial y_s} \Big|_{y_s=0} = -\frac{C_w}{1+\beta\theta_w} \exp\left(\frac{\theta_w}{1+\beta\theta_w}\right), \quad (23)$$

где  $C_w$  – объемная доля кислорода на поверхности материала;

$\kappa_\varepsilon$  – относительный коэффициент тепловой активности;

$$\kappa_\varepsilon = \sqrt{\frac{\lambda_s \rho_s c_{ps}}{\lambda \rho c_p}}.$$

Краевая задача (20) – (22) имеет граничные условия 1-го рода и ее решение может быть получено известными методами математической физики:

$$\theta_s(y_s, \tau) = \theta_{s0} + (\theta_w - \theta_{s0}) \operatorname{erfc}\left(\frac{y_s}{2\sqrt{\tau}}\right). \quad (24)$$

Однако при исследовании пожарной опасности материалов определенный интерес представляет собой температура на поверхности материала в момент воспламенения ( $\tau = \tau_*$ ), то есть значение температуры воспламенения  $\theta_w^* = \theta_w(\tau_*)$ . Для определения температуры  $\theta_w(\tau)$  воспользуемся условием сопряжения (23).

Получим выражение

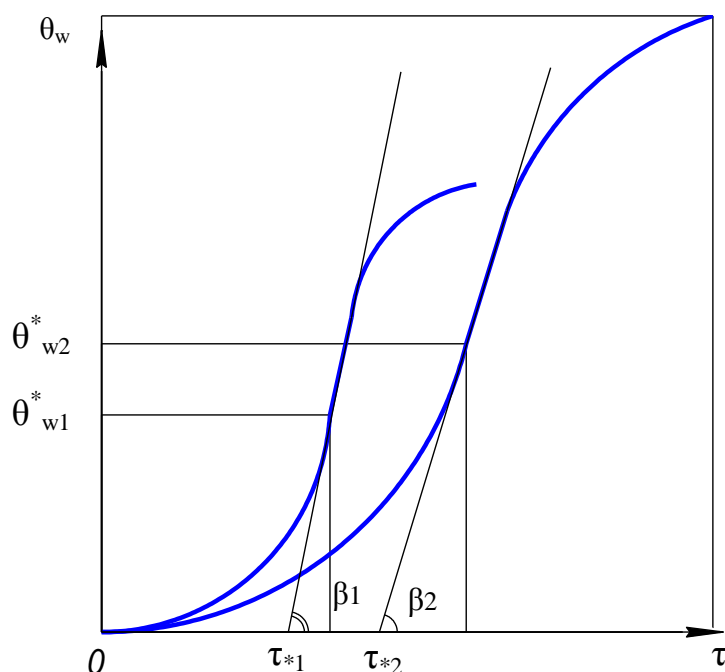
$$\theta_w = \theta_{s0} + \frac{2\sqrt{\tau}}{\kappa_\varepsilon \sqrt{\pi}} \left( \frac{\theta_{s0} - \theta_w}{I^* \sqrt{x}} + C_w \Omega \right),$$

графиком которого является кривая гистерезисного типа (см. рисунок),

где

$$I^* = \int_0^\eta \exp \left[ -\frac{Pr}{2} \int_0^\eta f d\eta \right] d\eta ;$$

$$\Omega = \frac{1}{1+\beta\theta_w} \exp \frac{Qw}{1+\beta\theta_w}.$$



Динамика температуры поверхности материала при нагревании его ламинарным тепловым воздушным потоком

Анализ динамики температуры нагревания поверхности материала свидетельствует, что рост температуры  $\theta_w(\tau)$  до определенного момента не существен. Это связано, прежде всего, с кинетическим режимом протекания химической реакции и с малым выходом летучих компонентов материалов. График имеет точку перегиба при  $\tau = \tau_*$ , что будет соответствовать переходу от кинетического к диффузионному режиму протекания реакции и времени индукции. Тангенс угла наклона касательной в точке перегиба относительно горизонтальной оси  $0\tau$  характеризует скорость изменения температуры  $\theta_w(\tau)$ , что служит определением воспламеняемости твердого материала.

Для определения времени индукции воспользуемся условием воспламенения:

$$\left. \frac{d\theta_w}{d\tau} \right|_{\tau=\tau_*} = \infty. \quad (25)$$

В равенстве (24) выражение в скобках является неявной функцией времени  $F[\theta_w(\tau)]$ . Применяя правила дифференцирования к выражению (24), также выполнив ряд преобразований, получим выражения для определения времени индукции и температуры воспламенения материала в следующем виде:

$$\sqrt{\tau_*} = \frac{\kappa_\varepsilon \sqrt{\pi}}{2} \frac{I^* \sqrt{x}}{I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^* - 1}; \quad (26)$$

$$\theta_w^* = \theta_{s0} + \frac{\theta_{\Pi} - \theta_w^* + I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^*}{I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^* - 1}. \quad (27)$$

**Выводы.** Получена аналитическая зависимость для определения температуры воспламенения твердого материала, на поверхности которого протекает экзотермическая реакция термического разложения, что позволяет исследовать влияние скорости химической реакции, теплофизических свойств материала и гидродинамики потока на воспламеняемость материалов, предназначенных для применения в шахтах.

### Список литературы / References

1. Эмануэль Н.М., Кнорре Д.Г. Курс химической кинетики. – М.: Высш. шк., 1984. – 463 с.  
Emanuel, N.M., Knorre, D.G. (1984). *Kurs khimicheskoy kinetiki* [Course of chemical kinetics]. Moscow: Vysshaya Shkola Publ., Russia, 463 p.
2. Беляев Н.И. Основы теплопередачи. – Киев: Выща шк., 1989. – 343 с.  
Belyayev, N.I. (1989). *Osnovy teploperedachi* [Heat-transfer principles]. Kiev: Vyshcha shkola Publ., Ukraine, 343 p.
3. Кузнецов Г.В., Мамонтов Г.Я., Таратушкина Г.В. Зажигание конденсированного вещества частицей // Химическая физика. – 2004. – Т. 23, № 3. – С. 67 – 72.  
Kuznetsov, G.V., Mamontov, G.Ya., Taratushkina, G.V. *Zazhiganiye kondensirovannogo veshchestva chastitsey* [Ignition of the substance condensed with a particle]. *Khimicheskaya fizika* [Chemical physics], 2004, vol. 23, no. 3, pp. 67 – 72.
4. Белов Г.В., Трусов Б.Г. Термодинамическое моделирование реагирующих систем. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. – 96 с.  
Belov, G.V., Trusov, B.G. (2013). *Termodinamicheskoye modelirovaniye reagiruyushchikh sistem* [Thermodynamic simulation of reactive systems]. Moscow: N.E. Bauman MSTU Publ., Russia, 96 p.

5. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплоотдача в химической кинетике. – М.: Наука, 1987. – 502 с.

Frank-Kamenetskiy, D.A. (1987). *Diffuziya i teplootdacha v khimicheskoy kinetike* [Diffusion and heat exchange in chemical kinetics]. Moscow: Nauka Publ., Russia, 502 p.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Н. Зинченко.  
Дата поступления рукописи 25.12.2015

*Valeriy Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director on science; e-mail: [niigd@mail.ru](mailto:niigd@mail.ru);  
the “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;  
283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38 062) 311-70-29*

## **SIMULATION OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN SOLID MATERIALS WHEN HEATING BY MEANS OF THE HIGH-TEMPERATURE AIR FLOW**

**Purpose.** To work out the mathematical model of the non-stationary heat exchange processes in the solid materials when heating them by means of the high-temperature air flow to find out the dependences of the ignition temperature of the material and of the induction time in the mine working.

**Methods.** Application of the thermodynamics and heat exchange laws to investigate the processes of heating the mechanical rubber and synthetic materials with the air flow.

**Results.** The mathematical model of the non-stationary heat exchange of the high-temperature air flow by the laminar flow conditions of the solid was worked out, and the dependences to calculate the ignition temperature of the material and the induction time were found out.

**Scientific novelty.** As a result of the theoretical investigations the dependences of the ignition temperature of the material and of the induction time on thermal parameters of the system air flow – solid material were received for the first time for the conditions of the mine working.

**Keywords:** *simulation; thermodynamics; solid materials; ignition temperature; induction time; air flow; mine working.*

УДК 614.841.45:544.772.42

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

*Андрей Михайлович Богомаз, аспирант; e-mail: [mchs-dnr@mail.ru](mailto:mchs-dnr@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 ДЫМОУДАЛЕНИЯ ПРИ ПОЖАРАХ В ЗДАНИЯХ С ПОМОЩЬЮ НАГНЕТАТЕЛЬНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ

**Цель.** Проведение теоретических исследований воздухораспределения и нагнетательной вентиляции при пожарах в зданиях и дымоудаления на путях эвакуации людей.

**Методика.** Комплексный подход, включающий анализ литературных источников по вопросам распространения дыма и токсичных продуктов горения в вентиляционной сети и противодымной защиты помещений различного типа, теоретические исследования потерь давления потока газов в любом направлении от аэродинамического сопротивления и температуры, расчётный метод при определении основных параметров распределения воздуха и дыма во время пожара.

**Результаты.** На основе анализа состояния вопроса по пожарам в зданиях различного назначения выполнено моделирование дымоудаления и предотвращения попадания дыма в коридоры и на лестничные пролёты. Система помещений, коридоров и лестничных пролётов рассмотрена как вентиляционная сеть. Для решения задачи воздухораспределения в ней использован метод межузловых депрессий, что даёт возможность делать научно обоснованный прогноз возможных ситуаций при пожарах в зданиях и с помощью нагнетательной вентиляции решать вопросы дымоудаления и эвакуации людей.

**Научная новизна.** Предложенный метод межузловых депрессий может быть использован для расчёта коммуникационных сетей зданий и сооружений любой сложности с целью чёткой организации дымоудаления и своевременной эвакуации людей.

**Практическая значимость.** Результаты расчёта методом межузловых депрессий различных возможных вариантов возникновения пожара с разной его мощностью и вариантами дымоудаления необходимо закладывать в планы ликвидации аварий подобного вида.

**Ключевые слова:** дым; пожарный газ; тепловая депрессия; вентиляционная сеть; противодымная защита; турбулентный режим; ламинарный режим; нагнетательная вентиляция; дымоудаление; метод межузловых депрессий.

**Постановка проблемы.** Пожары в зданиях различного назначения приносят большой материальный ущерб, в них гибнут десятки тысяч людей. Обеспечение пожарной безопасности – основная задача, которую необходимо решить при эксплуатации современных жилых и производственных зданий.

Среди вопросов, связанных с разработкой и совершенствованием способов и средств противопожарной защиты различных объектов, а также с повышением эффективности работы пожарных, борьба с дымом и токсичными газами занимает одно из основных мест.

Задымленность помещений и путей эвакуации при пожарах часто становится основной причиной гибели людей и серьезно усложняет действия подразделений пожарной охраны. Здания повышенной этажности, гостиницы, больницы оборудуют системами противодымной защиты, использующими различные варианты приточно-вытяжной вентиляции.



Особенно сложно вести борьбу с задымлением в замкнутых помещениях, имеющих ограниченные возможности для вентиляции, типа подвалов и полуподвалов, шахт, тоннелей и др. Большое практическое значение имеет борьба с задымлением на начальной стадии пожара в небольших помещениях административных зданий, производственных и складских помещениях при неразвившемся пожаре.

Этот вопрос становится все актуальнее в связи с расширением использования материалов и изделий на основе полимеров, горение и тление которых сопровождается выделением большого количества дыма и токсичных газов. Сгорание незначительного количества подобных материалов приводит к потере видимости и существенно усложняет обнаружение пожара и его подавление. При пожаре продукты горения быстро распространяются по коридорам, помещениям и этажам.

Очевидно, возникший пожар на первом этаже приводит к задымлению всех помещений, коридоров и лестниц, создавая угрозу жизни людей.

Как правило, по прибытии пожарные обнаруживают сильное задымление внутри здания значительных размеров или подвального помещения. И хотя дыхательные аппараты позволяют работать в густом дыму, пожарные могут столкнуться с проблемами при определении основных направлений распространения огня. В таком случае первоочередной аварийно-спасательной работой будет удаление дыма. Это неотъемлемая часть пожаротушения и последующих спасательных операций. Используя пожарные дымососы, спасатели снижают токсичность в помещении, температуру в нем и уменьшают концентрацию дыма в помещениях во время тушения пожаров.

Дальнейшие успехи борьбы с пожарами требуют фундаментального научного и экспериментального исследования, результаты которого можно было бы использовать и на этапе проектирования объектов, и при их эксплуатации. Важно не только изучение динамики пожаров в помещениях, но особенно организации дымоудаления и своевременной эвакуации людей.

**Цель работы.** Проведение теоретических исследований воздухораспределения и нагнетательной вентиляции при пожарах в зданиях и дымоудаления на путях эвакуации людей.

**Материалы исследований.** Несмотря на постоянное совершенствование алгоритмов и программ расчёта параметров пожара различными методами (интегральным, зонным или полевым), они, по сути, не затрагивают процессов распространения продуктов горения по всей сети, во всей системе помещений, коридоров и лестниц [1 – 3]. Это не даёт возможности моделировать различные варианты дымоудаления и эвакуации людей, а также научно прогнозировать действия спасателей.

Известные программы расчёта вентиляции в горном деле основаны на методе контурных депрессий, использующем теорию графов и включающем различные методы приближений к искомому результату. Они обладают тем недостатком, что рассматривают только турбулентный режим движения, не

включают ламинарный режим при отсутствии принудительной вентиляции, требуют замкнутости всех контуров без висячих ветвей, которыми могут быть коридоры и лестницы. Погашение невязок в контурах по депрессии даже до 1 Па не позволяет свести их к нулю и до конца решить вопрос устойчивости и опрокидывания струй пожарных газов.

Внедрение новых средств пожаротушения и дымоудаления вызывает необходимость разработки и совершенствования численных методов расчёта на ЭВМ распространения пожара и продуктов горения по всей сети помещений, коридоров и лестниц.

При отсутствии проветривания помещений, коридоров и лестниц в зданиях при пожарах движение воздуха может возникать под действием только тепловой тяги. В этих условиях будут наблюдаться не только турбулентные, но и ламинарные потоки.

Для описания потерь давления в любом направлении используем уравнение [4] движения смеси газов в векторной форме:

$$-gradP = \left( \frac{\nu}{k} + \frac{\beta \nu}{\sqrt{k}} \right) \rho \vec{v} + (\rho - \rho_0) \vec{g}, \quad (1)$$

где  $P$  – давление, Па;

$\nu$  – кинематическая вязкость газов, м<sup>2</sup>/с;

$k$  – коэффициент проницаемости среды, м<sup>2</sup>;

$\beta$  – эмпирическая константа турбулентности потока газов;

$v$  – модуль вектора скорости, м/с;

$\rho$  – плотность смеси газов при пожаре, кг/м<sup>3</sup>;

$\vec{v}$  – вектор скорости движения газов, м/с;

$\rho_0$  – плотность смеси газов при нормальных условиях, кг/м<sup>3</sup>;

$\vec{g}$  – вектор ускорения свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

В уравнении (1) градиент  $gradP$  означает перепад давления в любом направлении.

В проекциях на оси координат  $x$ ,  $y$  и в конечных разностях уравнение (1) примет вид

$$\left| \begin{array}{l} -\frac{\Delta P}{\Delta x} = \left( \frac{\nu}{k} + \frac{\beta |u|}{\sqrt{k}} \right) \rho u; \\ -\frac{\Delta P}{\Delta y} = \left( \frac{\nu}{k} + \frac{\beta |v|}{\sqrt{k}} \right) \rho v + (\rho - \rho_0) g, \end{array} \right. \quad (2)$$

где  $u$  – проекция вектора скорости на ось  $x$ , м/с;  
 $v$  – проекция вектора скорости на ось  $y$ , м/с;  
 $x$  – координата, направленная вдоль пола или потолка, м;  
 $y$  – координата, направленная от пола к потолку, м;  
 $g$  – ускорение свободного падения, равное  $9,81$  м/с<sup>2</sup>.

Поскольку плотность газов значительно меняется с температурой, выразим проекции массовой скорости движения газов через их массовые расходы. Обозначим площади поперечных сечений потоков через  $S_x$  и  $S_y$ .

В результате система уравнений (2) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\Delta P_x}{\Delta x} = \left( \frac{\rho_0 v}{S_x k} + \frac{T}{T_0} \frac{\beta \rho_0 |Q_x|}{S_x^2 \sqrt{k}} \right) Q_x; \\ -\frac{\Delta P_y}{\Delta y} = \left( \frac{\rho_0 v}{S_y k} + \frac{T}{T_0} \frac{\beta \rho_0 |Q_y|}{S_y^2 \sqrt{k}} \right) Q_y + (\rho - \rho_0)g, \end{array} \right. \quad (3)$$

где  $Q_x = \rho u S_x / \rho_0$  – массовый расход смеси газов вдоль пола, м<sup>3</sup>/с;  
 $Q_y = \rho v S_y / \rho_0$  – массовый расход смеси газов от пола к потолку, м<sup>3</sup>/с;  
 $T$  – переменная температура в элементе сети, К;  
 $T_0$  – температура при нормальных условиях, К.

Как видно, входящие в систему уравнений (3) расходы газовой смеси выражают, по сути, массовые расходы, делённые на постоянную плотность воздуха при нормальных условиях. Поэтому эти расходы можно считать константами, а множитель в турбулентной составляющей потока является переменной величиной, поскольку температура смеси газов будет меняться по длине потока. В то же время для чисто ламинарного режима такого наблюдаться не будет.

Обозначим приращения давлений через депрессии, а множители перед расходами смеси газов обозначим через аэродинамические сопротивления и получим

$$\left\{ \begin{array}{l} h_x = \left( R'_x + R''_x |Q_x| \right) Q_x; \\ h_y = \left( R'_y + R''_y |Q_y| \right) Q_y + (\rho - \rho_0)g. \end{array} \right. \quad (4)$$

Таким образом, в любом направлении выполняется закон двучленного сопротивления:

$$h = \left( R_{\text{л}} + R_m \left| Q \right| \right) Q + h_c, \quad (5)$$

где  $R_{\text{л}} = \frac{\rho_0 v l}{Sk}$  – ламинарная составляющая аэродинамического сопротивления, Па·с/м<sup>3</sup>;

$R_m = \frac{\rho_0 \beta \rho_0 l}{\rho S^2 \sqrt{k}}$  – турбулентная составляющая аэродинамического сопротивления, Па·с<sup>2</sup>/м<sup>6</sup>;

$l$  – длина пути в заданном направлении, м;

$h_c$  – источник тяги как подъёмная или принудительная сила, Па.

В частности, подъёмная сила под действием разности весов воздуха или температур выражается в виде второго слагаемого во втором уравнении системы (4). Это открывает широкие возможности для изучения переноса смеси газов в любой сложной системе помещений, коридоров и лестниц (см. рисунок).

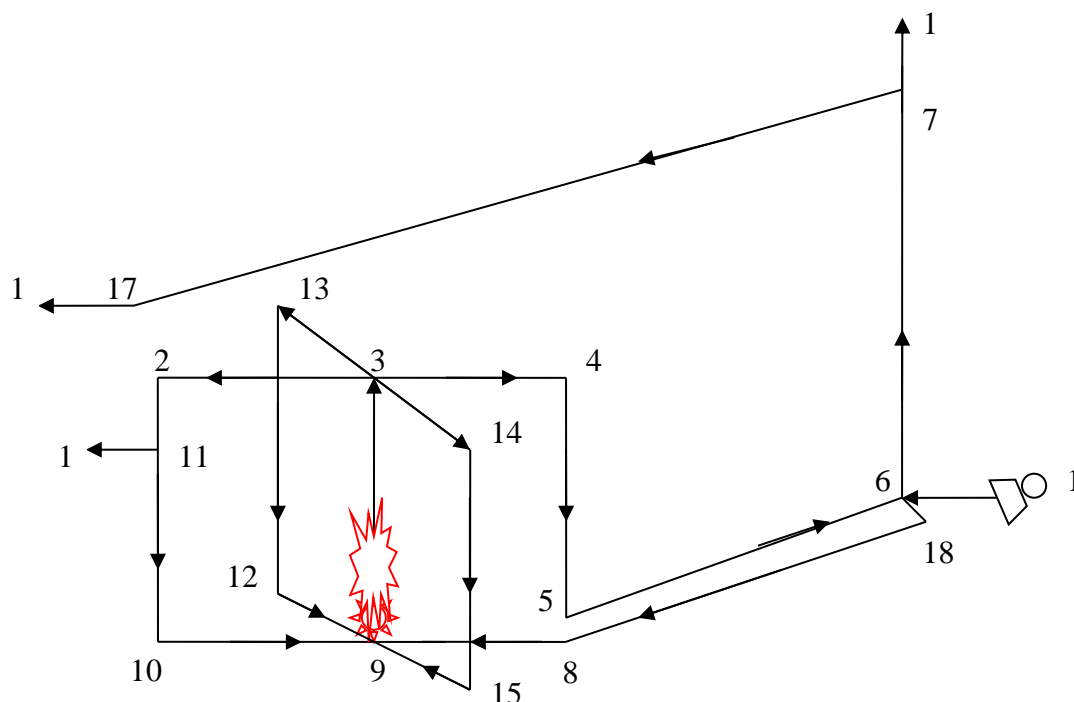


Схема движения потоков газов при пожаре в помещении и за его пределами

Здесь ветви 6-7-1 означают лестничный пролёт, а ветвь 5-6 означает верхнюю часть нижнего коридора. Понизу в коридоре по ветви 18-8 воздух попадает в помещение через дверь и движется к очагу пожара (узел 9). Слева от очага воздух также попадает к очагу пожара по ветви 10-9. Кроме того, от

других стен воздух, опускаясь, движется к очагу пожара (ветви 12-9 и 15-9). Под действием тепловой тяги пожарные газы вместе с дымом поднимаются к потолку (ветвь 9-3) и по потолку движутся в разные стороны (ветви 3-4, 3-2, 3-13 и 3-14). При наличии проёма в стене (окно) дым и пожарные газы будут выходить наружу по ветви 11-1. Проникнув в коридор по ветви 5-6 и поднимаясь по лестничному пролёту, дым и пожарные газы попадут в коридор второго этажа (ветвь 7-17), откуда могут удаляться наружу по ветви 1-17, а по ветви 7-1 проникнут в коридоры верхних этажей. Включение нагнетательной вентиляции в ветвь 1-6 может предотвратить проникновение дыма и токсичных газов в коридор 5-6, на лестничную клетку 6-7 и далее.

В образованных узлах 1-18 сумма приходящих и уходящих потоков должна равняться нулю:

$$\sum Q_i = 0, \quad (6)$$

где  $i$  – номер ветви, примыкающей к узлу.

Решая уравнение (5) относительно расхода смеси газов, получим

$$Q_i = \frac{2(h_i - h_{ci})}{R_{li} + \sqrt{R_{li}^2 + 4R_{mi}|h_i - h_{ci}|}}. \quad (7)$$

Подставляя формулу для расхода газов (7) в уравнение неразрывности вентиляционного потока (6), получим

$$F(h_i) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{2(h_i - h_{ci})}{R_{li} + \sqrt{R_{li}^2 + 4R_{mi}|h_i - h_{ci}|}} \right]. \quad (8)$$

В результате имеем количество нелинейных уравнений, равное количеству узлов. Для решения системы уравнений (8), выраженных для расходов через депрессии, можно использовать итерационный метод касательных [5], в котором невязка по расходу в каждом узле определяется по формуле

$$\Delta Q_j = -\frac{F(h_j)}{F'(h_j)}, \quad (9)$$

где  $j$  – номер узла.

Производную функции  $F$  находим путём дифференцирования уравнения (8) по  $h_i$ :

$$F'(h_i) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{\sqrt{R_{li}^2 + 4R_{mi}|h_i - h_{ci}|}}. \quad (10)$$

При последовательном приближении невязка (9) в узлах должна уменьшаться по расходу смеси газов до тех пор, пока не будет достигнута заданная высокая точность, например  $\Delta Q < 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$ .

Преимущество данного метода расчёта заключается в том, что автоматически сумма депрессий равна нулю для любого контура. Следовательно, количества уравнений (6) необходимо и достаточно для получения единственного решения задачи при заданных исходных данных аэродинамических сопротивлений  $R_{li}$  и  $R_{mi}$  и источников тяги  $h_{ci}$ .

Таким образом, метод межузловых депрессий может быть использован и для расчёта коммуникационных сетей зданий и сооружений любой сложности, включая помещения, коридоры и лестницы многоэтажных домов.

Как видно из табл. 1, при возникновении пожара посередине помещения первого этажа формируется тепловая депрессия и поток пожарных газов с расходом  $167 \text{ м}^3/\text{мин}$  устремляется от пола к потолку. Пожарные газы растекаются по потолку и устремляются вниз снова к очагу пожара. Часть пожарных газов и, следовательно, дым по потолку проникают в коридор с расходом  $20 \text{ м}^3/\text{мин}$ , а затем по лестнице и на второй этаж (ветви 5-6, 6-7, 7-17).

Таблица 1

Распределение воздуха и дыма при пожаре в помещении первого этажа до включения нагнетательной вентиляции

Номер ветви	Начальный узел	Конечный узел	Сопротивление турбулентное $R_m$ , кПа·с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup>	Сопротивление ламинарное $R_l$ , кПа·с/м <sup>3</sup>	Депрессия вентилятора $h_{кр}$ , кПа	Расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /мин
1	1	7	0,10	0,00	0,00	-1,89
2	1	17	0,10	0,00	0,00	-0,42
3	1	16	0,10	0,00	0,00	18,40
4	1	11	0,10	0,00	<b>0,00</b>	-11,32
5	7	17	0,50	0,02	0,00	0,40
6	6	7	0,20	0,01	0,00	2,28
<b>7</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>0,50</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>20,15</b>
8	4	5	0,10	0,00	0,00	20,15
9	3	4	0,10	0,00	0,00	20,17
10	2	3	0,10	0,00	0,00	-53,10

Окончание табл. 1

Номер ветви	Начальный узел	Конечный узел	Сопrotивление турбулентное $R_m$ , кПа·с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup>	Сопrotивление ламинарное $R_l$ , кПа·с/м <sup>3</sup>	Депрессия вентилятора $h_{кр}$ , кПа	Расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /мин
11	2	11	0,01	0,00	0,00	53,09
12	10	11	0,10	0,00	0,00	-41,78
13	9	10	0,10	0,00	0,00	-41,77
14	8	9	0,10	0,00	0,00	31,57
15	8	16	0,50	0,02	0,00	-18,40
16	9	12	0,10	0,00	0,00	-46,89
17	9	15	0,10	0,00	0,00	-46,89
18	12	13	0,10	0,00	0,00	-46,90
19	3	13	0,10	0,00	0,00	46,90
20	3	14	0,10	0,00	0,00	46,90
21	14	15	0,10	0,00	0,00	46,90
<b>22</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>0,10</b>	<b>0,00</b>	<b>-1,00</b>	<b>-167,11</b>
23	6	18	0,10	0,00	0,00	13,17
<b>24</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>0,10</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>-4,71</b>
25	8	18	1,00	0,04	0,00	-13,18

Установка вентилятора на входе в здание (ветвь 1-6) с расходом воздуха 139 м<sup>3</sup>/мин, меньшим расхода пожарных газов, который равен 160 м<sup>3</sup>/мин, через очаг пожара приводит, как указано в табл. 2, к дымоудалению из коридора (ветвь 5-6) и тем самым предотвращает распространение дыма на второй этаж, что способствует безопасной эвакуации людей с верхних этажей по лестнице.

Таблица 2

Распределение воздуха и дыма при пожаре в помещении первого этажа при работе нагнетательной вентиляции

Номер ветви	Начальный узел	Конечный узел	Сопrotивление турбулентное $R_m$ , кПа·с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup>	Сопrotивление ламинарное $R_l$ , кПа·с/м <sup>3</sup>	Депрессия вентилятора $h_{кр}$ , кПа	Расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /мин
1	1	7	0,10	0,00	0,00	-55,84
2	1	17	0,10	0,00	0,00	-21,48
3	1	16	0,10	0,00	0,00	-11,93
4	1	11	0,10	0,00	<b>0,00</b>	-49,45
5	7	17	0,50	0,02	0,00	21,47
6	6	7	0,20	0,01	0,00	77,30
<b>7</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>0,50</b>	<b>0,02</b>	<b>0,00</b>	<b>-27,00</b>
8	4	5	0,10	0,00	0,00	-27,00
9	3	4	0,10	0,00	0,00	-26,98
10	2	3	0,10	0,00	0,00	-79,58
11	2	11	0,01	0,00	0,00	79,58
12	10	11	0,10	0,00	0,00	-30,13

Окончание табл. 2

Номер ветви	Начальный узел	Конечный узел	Сопротивление турбулентное $R_m$ , кПа·с <sup>2</sup> /м <sup>6</sup>	Сопротивление ламинарное $R_l$ , кПа·с/м <sup>3</sup>	Депрессия вентилятора $h_{кр}$ , кПа	Расход воздуха $Q$ , м <sup>3</sup> /мин
13	9	10	0,10	0,00	0,00	-30,13
14	8	9	0,10	0,00	0,00	22,55
15	8	16	0,50	0,02	0,00	11,91
16	9	12	0,10	0,00	0,00	-53,89
17	9	15	0,10	0,00	0,00	-53,89
18	12	13	0,10	0,00	0,00	-53,90
19	3	13	0,10	0,00	0,00	53,90
20	3	14	0,10	0,00	0,00	53,90
21	14	15	0,10	0,00	0,00	53,89
<b>22</b>	<b>3</b>	<b>9</b>	<b>0,10</b>	<b>0,00</b>	<b>-1,00</b>	<b>-160,44</b>
23	6	18	0,10	0,00	0,00	34,46
<b>24</b>	<b>1</b>	<b>6</b>	<b>0,10</b>	<b>0,00</b>	<b>1,00</b>	<b>138,76</b>
25	8	18	1,00	0,04	0,00	-34,46

**Вывод.** Результаты расчёта на ЭВМ возможных вариантов возникновения пожара с различной его мощностью и вариантами дымоудаления необходимо учитывать в планах ликвидации аварий подобного вида.

### Список литературы / References

1. Анализ поведения дымовых потоков в закрытых пространствах. Chew M. Y. L., Wong N. H., Ho J. C. L. Smoke control in confined spaces / J. Appl. Fire Sci. – 2000-2001. – V.10, № 2. – Pp. 109 – 125.

Chew, M. Y. L., Wong, N. H., Ho, J. C. L. *Analiz povedeniya dymovykh potokov v zakrytykh prostranstvakh* [Smoke control in confined spaces]. *J. Appl. Fire Sci.*, 2000-2001, vol. 10, no. 2, pp. 109 – 125.

2. Зонное моделирование движения дыма в коридорах здания. Jones W.W., Matsushita T., Baum H.R. Smoke movements in corridors: adding the horizontal momentum equation to a zone model // NIST Spec. Publ. [Spec. Publ.]. – 1995. – №838-7. – P. 49.

Jones, W.W., Matsushita, T., Baum, H.R. (1995). *Zonnoye modelirovaniye dvizheniya dyma v koridorakh zdaniya* [Smoke movements in corridors: adding the horizontal momentum equation to a zone model]. NIST Spec. Publ. [Spec. Publ.], no. 838-7, p. 49.

3. Рекомендации по расчету вентиляционных систем противодымной защиты общественных зданий / Б.В. Грушевский, Л.Е. Герке, В.М. Есин и др. – М.: Стройиздат, 1987. – 36 с.

Grushevskiy, B.V., Gerke, L.Ye., Yesin, V.M. etc. (1987). *Rekomendatsii po raschyetu ventilyatsionnykh sistem protivodymnoy zashchity obshchestvennykh zdaniy* [Recommendations on calculation of smoke prevention ventilation systems of public buildings]. Moscow: Stroyizdat Publ., Russia, 36 p.



4. Лыков А.В. Тепломассообмен: справочник. – М.: Энергия, 1980. – 580с.  
Lykov, A.V. (1980). *Teplomassoobmen: spravochnik* [Heat-mass exchange: handbook], Moscow: Energiya Publ., Russia, 580 p.

5. Шкундин С.З., Иванников А.Л., Зинченко И.Н. Расчёт вентиляционных сетей угольных шахт методом межзловых депрессий // Уголь. – 2009. – № 1. – С. 35 – 37.

Shkundin, S.Z., Ivannikov, A.L., Zinchenko, I.N. *Raschyet ventilyatsionnykh setey ugol'nykh shakht metodom mezhozlovyykh depressiy* [Calculation of ventilation networks of coal mines by means of the interventilation net nodes method]. *Ugol'* [Coal], 2009, no. 1, pp. 35 – 37.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым  
Дата поступления рукописи 18.03.2016

*Igor Nikolayevich Zinchenko*, Cand. Sci. (Tech.), deputy head of department; e-mail: [zinstar@mail.ru](mailto:zinstar@mail.ru);  
*Andrey Mikhaylovich Bogomaz*, postgraduate student; e-mail: [mchs-dnr@mail.ru](mailto:mchs-dnr@mail.ru);  
the “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;  
283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38 062) 311-13-52

## SIMULATION OF SMOKE REMOVAL BY FIRES IN BUILDINGS BY MEANS OF THE BLOWING VENTILATION

**Purpose.** Carrying-out the theoretical investigations of the air distribution and blowing ventilation by the fires in the buildings and of the smoke removal in the evacuation ways of the people.

**Methods.** Complex approach including the analysis of literature sources on problems of distribution of smoke and toxic products of combustion in the ventilation network and of smoke protection of the rooms of various type, theoretical investigations of pressure losses of the gas flow in any direction because of the aerodynamic resistance and temperature, calculation method by determination of the principal parameters of the air and smoke distribution during the fire.

**Results.** On the basis of analysis of the state of the problem concerning the fires in the buildings of various purpose the simulation of the removal of the smoke and the prevention of the smoke ingress in corridors and flyers are fulfilled. The system of the rooms, corridors and flyers is considered as the ventilation network. To solve the problem of the air distribution in it the interventilation net nodes method was used, what enables to make the scientifically substantiated prognosis of possible situations by the fires in the buildings and to solve the problems of the smoke removal and evacuation of the people by means of the blowing ventilation.

**Scientific novelty.** The interventilation net nodes method proposed may be used for calculation of the communications schemes of the buildings and constructions of any complexity for the purpose of the efficient organization of the smoke removal and of the timely evacuation of the people.

**Practical value.** The results of calculation by means of the interventilation net nodes method of various possible variants of origin of the fire with its distinct power and smoke removal variants should be built in the plans of accident elimination of such type.

**Keywords:** *smoke; fire gas; thermal drop of ventilation pressure; ventilation network; smoke protection; turbulent conditions; laminar conditions; blowing ventilation; smoke removal; interventilation net nodes method.*

**УДК [622.868.4:622.281.82]:622.81**

**Юрий Федорович Булгаков**, д-р техн. наук, проректор; e-mail: [byf@mine.dgtu.donetsk.ua](mailto:byf@mine.dgtu.donetsk.ua);

Донецкий национальный технический университет;

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 300-24-96;

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

## **ЛОКАЛИЗАЦИЯ ВЗРЫВОВ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В ВЫРАБОТАННОМ ПРОНСТРАНСТВЕ ЛАВ ОБРУШЕНИЕМ ПОРОД КРОВЛИ**

**Цель.** Обосновать возможность ведения очистных работ при наличии очага пожара в выработанном пространстве.

**Методы.** Используются методы геомеханики, учтена гипотеза об однородности структуры обрушенных пород, образующих пористую проницаемую среду, которая отделяет действующие выработки от пожара. Описана физика процесса взрыва.

**Результаты.** Разработаны рекомендации по использованию свойств обрушенных горных пород при ведении горноспасательных работ.

**Научная новизна.** Установлена закономерность влияния ширины породной пробки и ее гранулометрического состава на характер развития и эффективность локализации взрыва метановоздушной смеси.

**Ключевые слова:** энергия; взрыв; фронт волны; гранулометрический состав пород; породная пробка.

**Постановка проблемы.** При отработке пологих пластов с управлением кровли полным обрушением существует реальная опасность возникновения пожаров вследствие самовозгорания угля в выработанном пространстве лавы. Сложность тушения таких пожаров обусловлена не только отсутствием подходов к очагу горения, но и возможностью взрывоопасного скопления горючих газов. Поэтому такие пожары, как правило, изолируют специальными перемычками на дальних подступах к аварийному участку [1]. Изоляция влечет за собой прекращение добычных работ, потерю дорогостоящего горношахтного оборудования и подготовленных к выемке запасов угля.

**Анализ последних исследований.** Работами ДонНТУ и НИИГД «Респиратор» обоснована возможность ведения очистных работ при наличии очага пожара в выработанном пространстве лавы [2, 4]. Эта идея реализуется при строгом соблюдении профилактических мер и правильном учете локализующих свойств обрушенных пород. Однако до настоящего времени локализующие свойства обрушенных пород изучены недостаточно. В основу исследований положена гипотеза об однородности структуры обрушенных

пород, образующих пористую проницаемую среду, которая отделяет действующие выработки от пожара, а также предположение об адиабатическом расширении газов в процессе взрыва.

**Цель исследования.** Необходимо обосновать возможность ведения очистных работ при наличии очага пожара в выработанном пространстве.

**Материалы и результаты исследования.** Физическая картина процесса взрыва в упрощенном виде представляется следующим образом. При взрыве метановоздушной смеси в выработанном пространстве выделяется определенное количество энергии, обусловленное объемом и составом горючих газов, которые по мере расширения воздействуют на обрушенные породы.

Энергия взрыва  $E_v$ ,  $\text{кг}\cdot\text{м}^2/\text{с}^2$ , с достаточной для расчетов точностью может быть определена из выражения

$$E_v = \rho_0 g_v v_0, \quad (1)$$

где  $\rho_0$  – плотность взрывчатой смеси (для метановоздушной смеси при нормальных условиях  $\rho_0 = 0,115 \text{ кг}/\text{м}^3$ );

$v_0$  – объем взрывчатой смеси,  $\text{м}^3$ ;

$g_v$  – удельная теплота взрыва в единицах механической работы,  $\text{м}^2/\text{с}^2$ , которая для любой взрывчатой смеси определяется из выражения

$$g_v = \frac{Q_v 427 g}{\sum n_i \mu_i}, \quad (2)$$

где  $Q_v$  – теплота взрыва, Дж;

$g$  – ускорение силы тяжести,  $\text{м}/\text{с}^2$ ;

$n_i$  – количество  $i$ -го вещества газовой смеси, моль;

$\mu_i$  – молекулярный вес  $i$ -го вещества смеси.

Значение  $g_v$  для стехиометрической метановоздушной смеси равно  $2,7 \cdot 10^6 \text{ м}^2/\text{с}^2$ .

Зная энергию взрыва, можно определить соответствующее ей давление  $\Delta P_\phi$ ,  $\text{кг}/\text{м}^2$ , во фронте взрывной волны:

$$\Delta P_\phi = \frac{7}{\sqrt[3]{1 + 7,12 \frac{P_0 L_3 F}{\eta E_v}}}, \quad (3)$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения горной выработки,  $\text{м}^2$ ;

$\eta$  – безразмерный коэффициент перехода энергии взрыва газозооушной смеси в воздушноу взрывную волну (при детонации  $\eta = 0,4 \dots 0,5$ );

$P_0 \approx 10,4$  МПа;

$L_3$  – длина зоны разлета продуктов взрыва, м.

$L_3$  примерно в 5-6 раз больше первоначальной длины участка зааазования, т.е.  $L_3 \approx 6L_0$ , где  $L_0$  – начальная длина зоны зааазования (для замкнутых объемов справедливо равенство  $V_3 \approx 6V_0$ ).

Для практических целей важно знать характерный линейный размер породной полосы, гарантирующей гашение взрыва и снижение давления во фронте волны  $\Delta P_\phi$  до безопасного для жизни людей значения (0,06 МПа), регламентированного Уставом ведения горноспасательных работ.

Энергия взрыва расходуется на преодоление сил трения и сопротивления обрушенных пород. В результате дренирования взрывных газов через обрушенные породы снижается давление во фронте взрывной волны. По мере падения давления происходит гашение пламени вследствие его фильтрации через пористую среду.

На основании вышеизложенного можно выделить основные величины, характеризующие процесс локализации взрыва обрушенными горными породами. К ним следует отнести давление во фронте взрывной волны, степень заполнения выработанного пространства, ширину полосы обрушенных пород и их гранулометрический состав. Взаимосвязь между указанными величинами может быть представлена зависимостью

$$h_p = k_1 k_2 H P_2, \quad (4)$$

где  $h_p$  – ширина полосы обрушенных пород, м;

$k_1$  – коэффициент заполнения выработанного пространства обрушенными породами, м<sup>-1</sup>;

$k_2$  – гранулометрический состав обрушенных пород, м;

$H$  – длина зааазованного участка, м;

$P_2$  – кратность превышения давления во фронте взрывной волны над атмосферным.

При определении значения  $P_2$  необходимо учитывать не только влияние скоростного напора, но и адиабатическое расширение взрывных газов. С учетом сказанного, кратность превышения давления во фронте взрывной волны над атмосферным равна

$$P_2 = [1 + (1 + \gamma)^{-1}] P_1 / P_0, \quad (5)$$

где  $P_1$  – давление во фронте взрывной волны, МПа;

$P_0$  – атмосферное давление, МПа;

$\gamma$  – безразмерный показатель адиабаты.

Подставив значение  $P_0$  в уравнение (4), получим

$$h_p = [1+(1+\gamma)^{-1}] k_1 k_2 H P_1 / P_0. \quad (6)$$

Уравнение (6) позволяет определить ширину породной полосы при известных значениях  $k_1$  и  $k_2$ .

Экспериментальная проверка взрывогасящих свойств обрушенных горных пород проходила в лабораторных и натуральных условиях. На этапе лабораторных исследований проверяли правомерность принятых гипотез об адиабатическом законе расширения взрывных газов в районе очага пожара, а также изучали влияние гранулометрического состава пород на эффективность локализации взрывов метановоздушных смесей.

На этапе натуральных испытаний уточняли количественные характеристики процесса, оценивали размеры отклонений теоретических данных от опытных, определяли пригодность теоретических зависимостей для описания механизма гашения пламени и уменьшения давления во фронте взрывной волны. Методика проведения экспериментов базируется на результатах теоретических исследований, а также на данных анализа материалов и документов, связанных с ликвидацией аварий при потенциальной угрозе взрыва метановоздушных смесей.

Экспериментальные исследования проводили на ударных трубах и в условиях натуральной горной выработки – штольне «Гранит». Ударная труба длиной 11,5 м закрыта с одной стороны толстостенным фланцем и состоит из отдельных секций ударных труб диаметром 0,4 м. Труба оснащена тензометрическими датчиками давления, датчиками пламени пленочного типа, а также электрическим воспламенителем метановоздушной смеси и пробоотборными устройствами. На заданном расстоянии от закрытого конца взрывной трубы из породы гранулометрического состава от 0,02 до 0,18 м выкладывали пористую преграду длиной от 1,1 до 3,0 м.

В ходе подготовки экспериментов породу перемешивали со взрывчатой угольной пылью пласта  $m_3$  с выходом летучих 29,3 и массовой долей золы и влаги соответственно 6,1 и 2,3 %. Общую массу пыли, расходуемой в эксперименте, исчисляли из расчета 320...350 г/м<sup>3</sup> объема взрывной трубы.

Приготовление взрывчатой метановоздушной смеси осуществлялось известным методом парциальных давлений. При этом массовая доля метана во взрывной камере объемом 160 л равна от 8 до 10 %. Последовательность выполнения экспериментов была следующей. Во взрывную камеру из баллона под давлением запускали «чистый» метан и создавали взрывчатую метановоздушную смесь предположительно стехиометрической концентрации. С помощью пробоотборников и интерферометра измеряли концентрацию метана на разных расстояниях от закрытого конца трубы. Включали инициатор взрыва – нихромовую спираль и фиксировали показания осциллографа. Рассчитывали скорость распространения пламени и ударной волны. Данные заносили в таблицу.

На этапе проведения натуральных экспериментальных исследований уточнялись количественные характеристики процесса локализации взрыва метановоздушной смеси породной пробкой. Породная пробка в данном случае имитировала фрагмент массива обрушенных горных пород. В ходе подготовки натуральных экспериментов в штольне обрабатывали параметры породной полосы и способы ее возведения, в этом случае материал пористой преграды подбирали таким образом, чтобы он в наибольшей степени соответствовал реальному гранулометрическому составу и литологическому составу горных пород. Для этих целей использовали породу, выдаваемую на поверхность шахты из подготовительных забоев. В составе породы содержалось около 35...40 % отбитого угля, угольной пыли с выходом летучих веществ 32...37 %, что указывало на взрывоопасность среды.

Натурные исследования проводили в штольне НИИГД, представляющей собой горизонтальную тупиковую горную выработку длиной 300 м, параллельно которой на всю длину пройден людской ходок. На расстоянии двухсот метров от тупиковой части штольни имеется сбойка длиной 75 м. Площадь поперечного сечения штольни  $S = 7,5 \text{ м}^2$ .

Для измерения давления во фронте взрывной волны по всей длине штольни расположены тензометрические датчики, работающие в комплекте с тензостанцией УТС-1-ВТ-12 и шлейфовым осциллографом К-115. Градуировка датчиков давления осуществлялась статическим методом с использованием энергии сжатого воздуха.

При проведении исследований в тупиковой части штольни имитировали газовыделение из обнаженной поверхности пласта, для чего из труб диаметром 50 мм был изготовлен специальный перфорированный коллектор. Для обеспечения равномерности метановыделения в трубах коллектора просверлили отверстия диаметром 5 мм. В качестве инициатора взрыва использовали нихромовую спираль, на которую подавали напряжение 220 В. Температура раскаленной спирали 750...800 °С. Высота расположения спирали изменялась от 0,5 до 3,0 м. Для регистрации пламени и скорости его фронта использовали датчики пламени.

Подготовка экспериментов включала возведение породной пробки с заданными геометрическими параметрами. В процессе подготовки экспериментальных исследований фиксировали следующие параметры: общую длину породной пробки, объем взрывной камеры, объемную долю метана, гранулометрический состав породы, место расположения инициатора взрыва относительно кровли и почвы выработки.

Необходимый для взрыва метан доставляли в автоцистернах и подавали по метанопроводу в тупиковую часть выработки (взрывную камеру) под избыточным давлением 0,01...0,03 МПа.

Отбирали пробы метановоздушной смеси с помощью вакуум-насоса с последующим контролем объемной доли метана интерферометром ЛИ-4.

Подготовка и проведение экспериментов проходили в следующем порядке:

- на расстоянии 12 м от тупика штольни возводили породную полосу шириной  $h_p$ , м, состоящую из породы гранулометрического состава  $k$ , м;
- на расстоянии 2 м от тупика выработки на высоте 0,8 м устанавливали инициатор взрыва — нихромовую спираль;
- запускали метан и осуществляли его равномерное перемешивание с помощью вентилятора местного проветривания для создания однородной метановоздушной смеси;
- включали осциллограф и подавали напряжение на спираль инициатора взрыва.

По результатам обработки осциллограмм оценивали влияние породной пробки на характер развития и эффективность локализации взрыва метановоздушной смеси (см. таблицу).

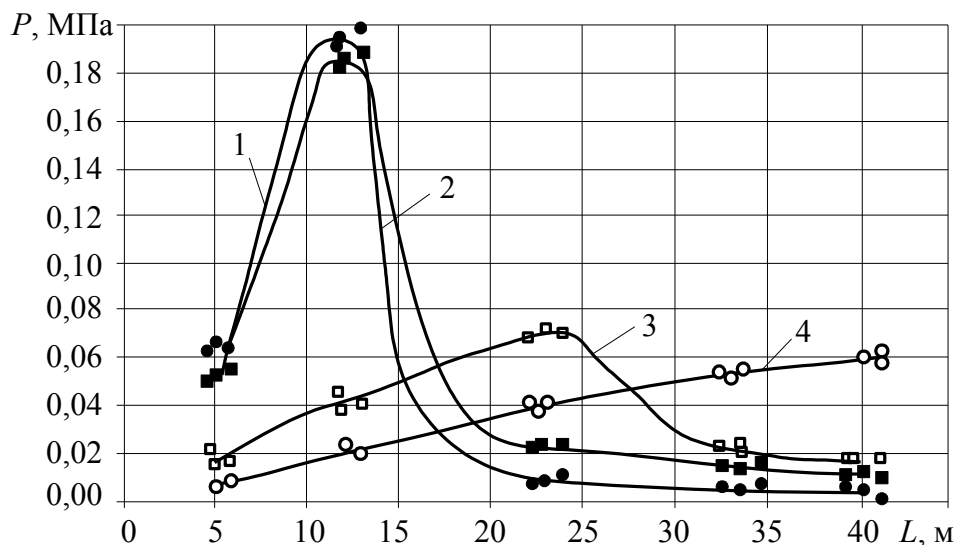
### Результаты экспериментальных исследований

Характеристика эксперимента	Распространение пламени			Распространение ударной волны			
	Измерительные пункты	Расстояние между измерительными пунктами, м	Скорость распространения пламени, м/с	Измерительные пункты	Давление во фронте ударной волны, МПа	Расстояние между измерительными пунктами, м	Скорость распространения ударной волны, м/с
Метановоздушная смесь, без преграды	1-2	2,0	20,0	1	0,18	10,4	675,0
	2-3	5,4	32,1	2	-		
	3-4	2,1	131,3	3	0,05		
Метановоздушная смесь, угольная пыль без преграды	1-2	2,0	12,5	1	0,125	6,0	478
	2-3	5,4	15,0	2	0,100		
	3-4	2,1	131,3	3	0,070		
Метановоздушная смесь, пористая преграда $h = 3$ м	1-2	2,0	15,6	1	0,1	10,4	54,0
	2-3	5,4	-	2	-		
	3-4	2,1	-	3	0,005		
Метановоздушная смесь, угольная пыль. Пористая преграда $h = 2$ м	1-2	2,0	12,5	1	0,100	6,0	178,0
	2-3	5,4	-	2	0,025		
	3-4	2,1	-	3	0,0075		

Анализ приведенных в таблице данных показывает, что пористые преграды, к которым относятся обрушенные горные породы, эффективно гасят взрывную волну и пламя взрыва бинарных газовых смесей и аэрогазодисперсных систем. При этом давление взрыва газовой смеси за преградой шириной 3 м снизилось в 20 раз, а преграда шириной 2 м снизила давление во фронте взрывной волны при взрыве пылегазовоздушной смеси в 14,5 раза. Ударная волна в обоих случаях вырождается в волну сжатия, распространяющуюся с дозвуковой скоростью.

При наличии воздушного зазора порядка 0,1...0,3 диаметра трубы интенсивность снижения давления резко сокращается (в 3-4 раза). Пламя во всех экспериментах гасло в пределах пористой преграды и не воспламеняло пылегазовоздушную смесь за ней даже при наличии воздушного зазора в верхней части трубы, достигающего 0,1...0,2 ее диаметра. При больших зазорах наблюдалась передача пламени за зону преграды. Так, в третьей серии экспериментов датчики зафиксировали воспламенение метановоздушной смеси за пределами породной пробки, размер которой был в два раза меньшим, чем в первой и второй серии, результатом которых стало полное гашение пламени. Очевидно, это объясняется тем, что энергоемкость породной преграды оказалась меньше энергии, выделившейся в результате взрыва метановоздушной смеси.

Крупномасштабные экспериментальные исследования, проведенные в штольне, показали, что в случае отсутствия защитной породной пробки (нулевая серия экспериментов) по выработке распространяется комплекс аэродинамических возмущений в виде ударной волны и фронта пламени. При этом ударная волна формируется на удалении 50...55 м от места воспламенения метановоздушной смеси и со скоростью 370...470 м/с распространяется по участку выработки длиной 150...160 м, а потом вырождается в волну сжатия. Давление во фронте волны в зоне распространения взрыва колеблется от 0,13 до 0,2 МПа (максимум достигается в 160 м от инициатора взрыва). Характер нарастания давления по штольне показан на рисунке (кривая 4). При этом пламя распространяется на расстояние 60...70 м.



Изменение давления взрыва в штольне при длине породной пробки:

1 – 6 м; 2 – 3 м; 3 – 8 м; 4 – при отсутствии защитной породной пробки



Осциллограмма показала, что нарастание давления имеет различный характер в разных местах выработки. Так, датчик, расположенный в тупиковой части выработки, непосредственно у источника воспламенения, фиксировал плавное нарастание давления, что свидетельствует об отсутствии ударной волны. На расстоянии 50 м от инициатора взрыва датчик фиксировал подобие ударной волны, при этом давление было 0,06 МПа. Далее, при распространении взрывных газов фронт волны приобретает более резкие очертания и на расстоянии 150 м становится практически плоским. При этом давление во фронте волны равно  $P = 0,18...0,20$  МПа. С этого момента по выработке начинает распространяться развитая ударная волна, которая постепенно теряет энергию, генерируемую взрывом. Энергия взрывной волны расходуется на нагревание и сжатие воздуха, трение о стенки выработки. Давление во фронте ударной волны, выходящей из устья штольни, равно 0,12 МПа, что в 200 раз превышает значение, допустимое Уставом ведения горноспасательных работ.

При этом энергия взрыва расходуется на выполнение работы по преодолению сил внутреннего трения и на перемещение породной пробки. Указанные процессы сопровождаются теплообменом между взрывными газами и породной пробкой, теплоемкость которой обусловлена как природой породы, так и ее размерами, которые определяют суммарную площадь поверхности, поглощающей теплоту. Очевидно, что взрывоустойчивость породной пробки обусловлена в первую очередь ее шириной, а во вторую – гранулометрическим составом породы.

Во второй серии экспериментов длина породной пробки была минимальной и равнялась 3 м. Размеры кусков породы  $0,3 \times 0,4 \times 0,2$  м. Оказалось, что в этом случае энергия взрыва значительно превышала энергоемкость породной пробки, вследствие чего произошло разрушение последней. При этом давление в тупиковой части выработки нарастало по сравнению с нулевой серией экспериментов (т.е. без породной пробки) до 0,07 МПа в течение 0,8 с. Скорость фронта пламени – около 60 м/с, а длина распространения пламени 12 м (до породной пробки), что свидетельствует о поглощении тепловой энергии взрыва породой. Датчики пламени, расположенные за породной пробкой, не зафиксировали наличия теплового импульса, в отличие от нулевой серии экспериментов, когда пламя распространялось на 60...70 м от тупика. Непосредственно за породной пробкой давление взрывной волны достигало 0,05...0,06 МПа. Это говорит о том, что породная пробка не выполнила функцию редуцирования избыточного давления до безопасного значения. Развитие взрывного процесса продолжалось, и максимум избыточного давления был зафиксирован за породной пробкой.

Таким образом, породная пробка длиной 3 м практически не влияет на характер формирования ударной волны.

Логическим продолжением экспериментов было удлинение породной пробки с целью увеличения ее энергоемкости.

В третьей серии экспериментов ширина породной пробки была равна 6 м, гранулометрический состав пород был следующим: 30 %  $K = 0,04 \times 0,03 \times 0,02$  и 70 %  $K = 0,03 \times 0,3 \times 0,03$  м. При взрыве  $100 \text{ м}^3$  стехиометрической метановоздушной смеси происходило «запирание» взрывных газов в течение 1 с. При этом давление в тупиковой части выработки возросло до максимального значения  $P = 0,195$  МПа, после чего начало падать.

Падение давления объясняется частичной подвижкой породной пробки и прорывом взрывных газов через нее. За породной пробкой давление не превысило 0,035 МПа (см. рисунок, кривая 1). По сравнению с нулевым опытом давление на расстоянии 18 м (т.е. непосредственно за породной пробкой) было примерно одинаково, однако затем проходит дальнейшее развитие взрывного процесса, в то время как характер кривой 3 говорит о перерождении взрывной волны в волну сжатия. Таким образом, породная пробка шириной 6 м полностью гасит пламя, а давление во фронте волны снижает в 6 раз по сравнению с нулевым экспериментом.

Четвертая серия экспериментов проведена в аналогичных условиях при ширине породной пробки, равной 8 м, гранулометрический состав пород был следующим:  $K = 0,5 \times 0,4 \times 0,3$  м. В качестве закладочного материала использовали шахтную породу.

Как показали осциллограммы, сдерживание взрывных газов в замкнутом объеме продолжалось в течение 1,1 с. Давление при этом достигало 0,2 МПа, после чего взрывные газы проникли за породную пробку, затрачивая энергию на преодоление сил внутреннего трения, нагревание и перемещения породы. Вследствие энергетических потерь давление взрывных газов за породной пробкой было равно 0,012 МПа, что почти в 3 раза ниже, чем в предыдущем опыте с  $h_p = 6$  м. Безопасного уровня давление в опыте № 4 (кривая 3) достигло на расстоянии 20 м от породной пробки.

Таким образом, натурные эксперименты подтвердили предположение о способности обрушенных пород полностью гасить пламя и снижать давление до безопасного уровня.

Следующая серия исследований, состоящая из 17 экспериментов, проведенных в идентичных условиях, но без применения угольной пыли, была направлена на более детальное изучение характера распространения взрыва по ударной трубе с применением породной защитной пробки и без нее. В этом случае, как и в предыдущей серии экспериментов, зарегистрировано гашение пламени при его входе в пористую среду, а также резкое снижение давления во фронте взрывной волны.

Так, при взрывах без породной пробки давление в конце трубы достигало 0,4...0,6 МПа. Пробка длиной 1,1...1,9 м способствовала снижению этого

давления до 0,057 и 0,036 МПа соответственно. Увеличение длины породной пробки до 2,3...3,0 м приводило к снижению давления до безопасного значения.

Фактически этот показатель был значительно ниже. При визуальном осмотре породной пробки можно было обнаружить, что в верхней части трубы зазор между пробкой и поверхностью трубы достигал 3...5 см. При взаимодействии взрыва с породной пробкой последняя частично разрушалась. С увеличением длины пробки степень разрушения уменьшалась. Так, пробка длиной 1,1 м, погасившая взрыв метановоздушной смеси, была полностью разрушена, а пробка длиной 3 м была разрушена на 50 % только пятым взрывом.

**Выводы.** Проведенный комплекс лабораторных и натурных исследований позволил разработать научно обоснованные рекомендации по использованию обрушенных горных пород при локализации взрывов метановоздушной смеси и ведении горноспасательных работ.

### Список литературы / References

1. Агеев В.Г. Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах. – Донецк: Арпи, 2014. – 338 с.

Ageyev, V.G. (2014). *Vzryvozashchita pri izolyatsii pozharov v ugol'nykh shakhtakh* [Explosion protection when isolation of fires in coal mines]. Donetsk: Arpi Publ., Ukraine, 338 p.

2. Эколого-технологические проблемы безопасной отработки угольных месторождений: монография / С.С. Гребенкин, И.Ф. Иванов, Ю.Ф. Булгаков и др.; под общ. ред. С.С. Гребёнкина и И.Ф. Иванова. – Донецк: ДонНТУ, 2004. – 256 с.

Grebyenkin, S.S., Ivanov, I.F. (eds), Bulgakov, Yu.F. etc. (2004). *Ekologo-tekhnologicheskiye problemy bezopasnoy otrabotki ugolnykh mestorozhdeniy: Monografiya* [The ecotechnological problems of the safe development of coal deposits: Monograph]. Donetsk, DonNTU Publ., Ukraine, 256 p.

3. Пашковский П.С., Шайтан И.А., Коваль И.Н. Локальный прогноз эндогенной пожароопасности выемочного участка в процессе ведения горных работ // Уголь Украины. - 1992. - № 11. - С. 17-19.

*Pashkovskiy, P.S., Shaytan, I.A., Koval', I.N. Lokalnyy prognoz endogennoy pozharoopasnosti vyemochnoy uchastka v protsesse vedeniya gornyykh rabot* [The local prognosis of the endogenous fire hazard of the mining district in the process of carrying-out the mining operations]. *Ugol' Ukrainy* [Coal of the Ukraine], 1992, no. 11, pp. 17-19.

4. Технологии закладки и экологические особенности оставления породы в выработанном пространстве подземных предприятий: монография / под общ. ред. С.С. Гребёнкина, А.И. Ильина. – Донецк: Регион, 1999. – 342 с.

Grebyenkin, S.S., Il'in, A.I. (eds) (1999). *Tekhnologii zakladki i ekologicheskiye osobennosti ostavleniya porody v vyrabotannom prostranstve podzemnykh predpriyatiy: Monografiya* [Technologies of backfilling and ecological peculiarities of leaving the rock in the waste of underground enterprises: Monograph]. Donetsk: Region Publ., Ukraine, 342 p.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В.Г. Богатыревым.  
Дата поступления рукописи 09.03.2016

**Yuriy Fyedorovich Bulgakov**, Dr. Sci. (Tech.), pro-rector; e-mail: [byf@mine.dgtu.donetsk.ua](mailto:byf@mine.dgtu.donetsk.ua);  
the Donetsk National Technical University;

283001, 58, Artyem st. Phone. (+38 062) 300-24-96;

**Sergey Semyenovich Grebyenkin**, Dr. Sci. (Tech.), leading scientific associate; e-mail: [opbush@mail.ru](mailto:opbush@mail.ru);

**Dmitriy Sergeyeovich 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 DNR;

283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38 062) 311-44-92

## LOCALIZATION OF METHANE-AIR MIXTURE EXPLOSIONS IN THE WASTE OF LONGWALL FACES BY MEANS OF BREAKING-DOWN THE ROOF ROCKS

**Purpose.** To substantiate the possibility of carrying-out the winning operations in the presence of a seat of fire in the waste.

**Methods.** The methods of geomechanics are used, the hypothesis about homogeneity of the structure of the rocks broken-down forming the porous permeable medium that separates the operating mine workings from the fire is taken into account.

**Results.** The recommendations to use the properties of the rocks broken-down by carrying-out the mine-rescue operations are worked out.

**Scientific novelty.** The mechanism of influence of the width of the rock plug and its granulometric composition on the character of development and efficiency of localization of the methane-air mixture explosion is established.

**Keywords:** *energy; explosion; wave front; granulometric composition of the rocks; rock plug.*

УДК 614.8”363”:[661.25:544.772.3]

*Марина Александровна Бречалова, науч. сотр.; e-mail: [Holstinina\\_M@mail.ru](mailto:Holstinina_M@mail.ru);*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-41-16*

## МЕХАНИЗМ ХИМИЧЕСКОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ ПАРАМИ СЕРНОЙ КИСЛОТЫ

**Цель.** Обосновать причину и механизм возникновения химического заражения в виде токсичного тумана при авариях, в результате которых разливается серная кислота на подстилающую поверхность.

**Методы.** Сравнительный анализ реальных масштабов зон заражения от разлившейся серной кислоты в результате железнодорожной аварии с прогнозом зон заражения. Рассмотрен механизм образования аэрозольного тумана в результате разливания серной кислоты на подстилающую поверхность.

**Результаты.** Исследована зависимость формирования аэрозольного облака химически опасных веществ от характера подстилающей поверхности и пролитой на нее жидкости. Определены показатели, которые не учтены в существующей методике прогнозирования масштабов зон заражения.

**Научная новизна.** Обнаружен ряд показателей, учет которых позволит максимально снизить расхождения значений химического загрязнения после реальных аварий с его прогнозом.

**Ключевые слова:** авария; токсичный туман; серная кислота; аэрозоль; зона поражения; подстилающая поверхность; химически опасные вещества.

**Постановка проблемы.** В связи с чрезвычайно высокой техногенной и антропогенной нагрузкой Донецкого региона безопасность жизни и здоровья людей является одной из важных и значимых проблем.

Одна из причин проникновения химически опасных веществ в окружающую среду – это аварии, связанные с выбросом токсических веществ. Данные аварии можно разделить на несколько видов:

- аварии, в результате которых происходит выброс (разливание) химически опасных веществ при их использовании, переработке и хранении;
- аварии в результате транспортирования химически опасных веществ;
- аварии, вследствие которых образуются и распространяются химически опасные вещества в процессе протекания химических реакций, начавшихся в результате других производственных аварий.

Анализируя возможные аварии и другие чрезвычайные ситуации для нашего региона, стоит выделить аварии с выбросом (разливанием) химически опасных веществ при их хранении и транспортировании. Значительно большее количество токсических веществ по объему содержится на складах предприятий и в емкостях для транспортирования, чем выделяется при производстве и потреблении в технологических линиях.

Транспортируют химически опасные вещества автомобильным и железнодорожным транспортом, что регламентируют требования действующих нормативных документов. В качестве наиболее вероятных аварийных ситуаций на транспортных магистралях, которые могут привести к возникновению поражающих факторов, являются ситуации с разливанием химически опасных веществ. Большую опасность для окружающей среды представляют разлившиеся кислоты, многие из которых, особенно в концентрированном виде, дымят, выделяя ядовитые пары.

В результате повреждения емкостей для хранения или транспортирования химически опасных веществ существует большая вероятность распространения ядовитых веществ далеко за пределы предприятия, что приводит к массовому поражению людей и заражению территорий.

**Материалы исследования.** Серная кислота – одна из наиболее часто используемых кислот на производствах и выделяющиеся при ее разливании вещества могут создавать опасность жизни и здоровью человека. В случае многотонных неконтролируемых выбросов и диспергирования в окружающую среду серная кислота вызывает тяжелые химические ожоги кожных покровов, глаз и верхних дыхательных путей с возможным смертельным исходом.

В данной статье рассмотрена одна из потенциально опасных ситуаций – разливание серной кислоты во время железнодорожной аварии. В случае такой аварии может произойти поражение людей не только непосредственно на объекте или месте аварии, но и за его пределами, в ближайших населенных пунктах. Поэтому необходима методика оценки степени угрозы, определения интенсивности и размеров зон химического загрязнения при подобных авариях.

На примере аварии, происшедшей в августе 2002 г. в США, на востоке штата Теннесси, в районе города Ноксвилл, рассмотрен подход к расчету прогноза зон поражения и приведены результаты оценки уровня опасности после разливания серной кислоты на подстилающую поверхность.

Во время железнодорожной аварии в результате крушения товарного поезда компании Norfolk Southern 20 грузовых вагонов и два локомотива сошли с рельсов в 30 км от г. Ноксвилл (штат Теннесси). Одна железнодорожная цистерна перевернулась, и из нее вылилось около 220 т серной кислоты. Над местом аварии сразу же образовалось огромное белое облако аэрозоля серной кислоты, которое можно было видеть с расстояния нескольких километров. В первые часы после аварии были срочно эвакуированы 8 тыс. человек, в основном жители селений Фаррагут и Терки Крик, расположенных в радиусе 2,5 км от места аварии. К вечеру эвакуировали уже 30 тыс. жителей из более чем 20 населенных пунктов, расположенных в радиусе 10 км от места аварии. Проживающим вне десятикилометровой зоны – в том числе и жителям Ноксвилла – было рекомендовано отключить кондиционеры и по возможности не выходить из домов. В больницы штата доставили около 20 человек. Все поступили с жалобами на рези в глазах, боли в горле и легкие отравления [1].

Ссылаясь на данные случившейся аварии, прогнозировали масштаб заражения (см. таблицу).

Сравнительная характеристика реальной химической обстановки  
и расчета зон поражения в результате аварии

Вариант прогноза	Время после начала аварии $t$ , ч	Основные показатели расчета				
		Эквивалентная масса вещества, т	Глубина зоны заражения, км	Площадь зоны фактического заражения, км <sup>2</sup>	Площадь зоны возможного заражения, км <sup>2</sup>	Площадь заражения химически опасным веществом $S_v$ , км <sup>2</sup>
Заблаговременный прогноз масштаба возможного заражения	0,5	0,0019	0,0727	0,0011	0,0166	0,0006
	1	0,0033	0,1266	0,0038	0,0503	0,0021
	3	0,0080	0,3049	0,0273	0,2918	0,0154
	12	0,0243	0,5483	0,1161	0,9437	0,0498
	24	0,0424	0,7601	0,2563	1,8135	0,1451
Прогноз масштабов заражения вскоре после аварии	0,5	0,0128	0,1851	0,0040	0,1075	0,0039
	1	0,0224	0,2352	0,0074	0,0217	0,0074
	3	0,0539	0,3919	0,0254	0,0603	0,0254
	12	0,1636	0,6350	0,0881	0,1582	0,0881
	24	0,2849	0,8351	0,1751	0,2736	0,1751

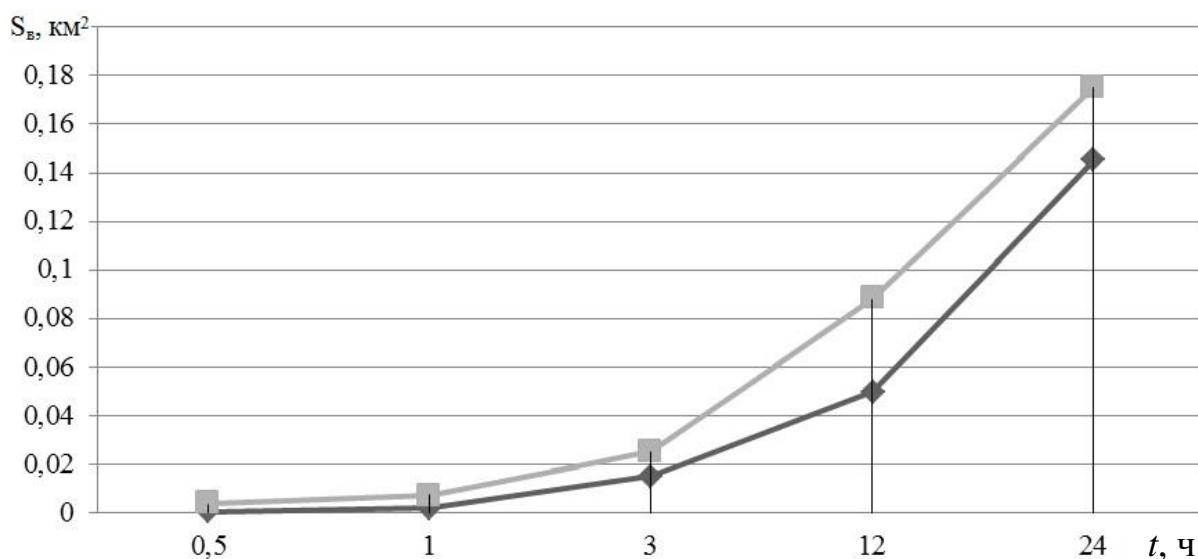
Исходные данные в одном и другом случае идентичны, кроме показателей метеохарактеристик. Для прогноза масштабов заражения вскоре после аварии брали метеоусловия, приближенные к реальным. В то же время для заблаговременного прогнозирования масштабов возможного заражения на случай аварии принимали показатели согласно [2].

На рисунке представлены результаты расчета масштаба заражения территории при проливе серной кислоты в результате железнодорожной аварии.

Проанализировав проведенные расчеты и сравнив их с реальными показателями случившейся аварии, видим существенную разницу (например, по расчетам, максимальная зона заражения в течение первых часов после аварии равна 0,025 км<sup>2</sup>, а по факту были эвакуированы жители в радиусе 2,5 км от места аварии).

Также на основании проведенных расчетов видно, что серная кислота практически не испаряется. В результате чего можно сделать ложный вывод, что при разливе серной кислоты опасность заражения химически опасным веществом незначительна. Что же послужило причиной образования аэрозольного тумана?

Предположим, что причиной образования тумана серной кислоты явилась реакция пролитого химически опасного вещества на подстилающую поверхность, которой в данном случае является железнодорожное полотно. В этой ситуации токсическое действие обусловлено не испарением кислоты, а образованием тумана.

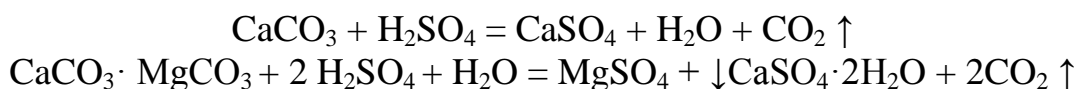


Сравнительная характеристика химической обстановки расчета зон поражения при прогнозировании масштабов возможного заражения и заражения вскоре после аварии:

◆ — после случившейся аварии; ■ — прогнозирование аварии

Чаще всего используют применяемые для строительных целей, в том числе и для строительства железной дороги (балластный слой железнодорожного полотна), осадочные породы, которые в большинстве своем содержат карбонаты, алюмосиликаты, кремнезем и сульфаты. К классу карбонатов относятся минералы – соли угольной кислоты. Наиболее распространенные – кальцит и доломит.

Концентрированная серная кислота достаточно эффективно вступает в реакцию с карбонатными составляющими горной породы. Уравнения реакций, происходящих при воздействии серной кислоты на кальцит и доломит, таковы:



В результате реакций серной кислоты с данными минералами происходит бурное выделение углекислого газа. Образующиеся пузырьки газа поднимаются вверх через слой пролитой серной кислоты. Формирование газообразной фазы вызывает физико-химические явления, играющие значительную роль в образовании аэрозольного тумана с парами серной кислоты. Газ стремится покинуть жидкость. Оторвавшись от места возникновения, пузырьки принимают сферическую форму и направляются к поверхности. Отрывание пузырька углекислого газа происходит после его увеличения до определенных размеров, который соответствует диаметру,



определяемому взаимодействию силы тяжести, поверхностного натяжения и др. Частота отделения пузырьков зависит от скорости их роста и диаметра.

В зависимости от наличия стабилизирующих факторов, пузырьки углекислого газа, которые всплывают на поверхность, формируют пену или разрываются. При разрыве на поверхности пролитой жидкости пузырьки формируют капли двух видов: мелкие, которые, как при взрыве, разлетаются с большой начальной скоростью в разных направлениях, и крупные капли, движение которых направлено вверх.

В относительно небольшом количестве на месте лопнувшего пузырька образуются крупные капли вследствие разрушения восходящего столба жидкости. Эти капли вызывают эффект фонтанирования.

Также крупные пузырьки лопаются на поверхности пролитой жидкости, что вызывает локальное образование гораздо более мелких пузырьков. Площадь поверхности капелек токсичного тумана очень большая. Частицы тумана имеют малые размеры, но характеризуются большой суммарной поверхностью в единице объема.

Скопление таких пузырьков формирует облако, которое подхватывается воздушным потоком и, двигаясь вместе с ним, достаточно быстро рассеивается в результате оседания частиц серной кислоты на поверхность земли. Данный процесс непрерывен, пока идет реакция серной кислоты и карбонатных пород, в результате чего возникает новая доза образовавшихся капель в виде тумана. Глубина распространения аэрозоля существенно зависит от размера частиц и скорости ветра.

Этот туман очень устойчив, так как при температуре, близкой к комнатной, давление паров серной кислоты мало (при 20 °С давление паров серной кислоты равно 0,01 Па), в результате чего и скорость испарения капель серной кислоты незначительна. Кроме того, в атмосферном воздухе обычно содержатся пары воды, которые поглощает серная кислота, вследствие чего частицы тумана увеличиваются. Какая-то часть вслед за образованием тумана из паров серной кислоты, следуя коагуляции аэрозольных частиц, будет подвержена осаждению под действием силы тяжести, центробежной силы и т.д.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что в результате таких аварий причиной отравления будет токсичный туман, образующийся при взаимодействии серной кислоты и карбонатных пород.

Не каждое высокотоксичное вещество может представлять опасность для людей, находящихся в возможных зонах поражения. В то же время вещества, не представляющие серьезной опасности поражения, согласно методике [2], могут создавать высокие концентрации в виде аэрозоля в воздухе и оказаться гораздо опаснее высокотоксичного вещества.

Результаты расчетов масштаба химического заражения для аварии, происшедшей в августе 2002 г. в районе города Ноксвилл штата Теннесси (США), которые выполнены в соответствии с методикой [2], дают неудовлетворительные результаты и не соответствуют основным показателям

данной аварии. Причиной этому послужили не принятые во внимание важные показатели. При расчетах прогнозирования масштабов зон поражения возникает необходимость учитывать следующее:

- характер и физико-химические свойства подстилающей поверхности;
- процесс испарения жидкости из грунта в результате фильтрования с поверхности земли;
- вязкость пролитого вещества;
- скорость и интенсивность испарения вещества;
- возможность образования токсичного облака;
- процессы, протекающие в период формирования аэрозольного облака;
- процесс испарения с поверхности поднявшихся частиц в воздух в виде аэрозоля.

Необходимо учитывать тот факт, что при производстве, хранении и транспортировании химически опасных веществ их агрегатное состояние может существенно отличаться от состояния в обычных условиях. Это существенно повлияет на количество выброшенного (пролитого) ядовитого вещества.

При учете необходимых параметров в оценке химической обстановки можно говорить о более точном определении интенсивности и размеров зон химического загрязнения, о разработке соответствующих мероприятий по защите окружающей среды, подбору маршрутов эвакуации, количества транспортных средств, требуемых для эвакуации, обоснованию сроков эвакуации и прочем, что позволит сохранить жизнь и здоровье людей.

**Выводы.** Наличие в Донбассе густонаселенных регионов и высокой степени возникновения аварий с выбросом (разливанием) химически опасных веществ требует быстрой оценки ситуации, определения плана действий по ликвидации аварии с опасным грузом, принятия незамедлительных мер по спасению людей, особенно в первоначальный период возникновения чрезвычайной ситуации.

Оперативные действия по ликвидации чрезвычайной ситуации в результате правильного прогноза зон поражения позволят выиграть время для накопления сил и средств, необходимых для наступления на очаг химического заражения, и выполнить меньшими силами работы по спасению людей и ликвидации аварии.

Сравнивая результаты расчетов прогноза зон заражения с тем, что случилось во время железнодорожной аварии, в результате которой разлилась серная кислота, можно сделать вывод, что методика [2] не подходит для расчетов масштабов зон химического заражения для такого вида аварий. Она дает заведомо ложный результат. Поэтому необходимо проводить исследования в этом направлении, изучить интенсивность образования капель токсичного тумана и создать новую методику расчета.

## Список литературы / References

1. Козлитин П.А. Обоснование и разработка методов оценки техногенных опасностей тепловых электростанций // Вестник Саратовского государственного технического университета. – Саратов, 2010. – № 4 (49), вып. 1. – С. 176 – 182.

Kozlitin, P.A. (2010). *Obosnovaniye i razrabotka metodov otsenki tekhnogennykh opasnostey teplovykh elektrostantsiy* [Substantiation and development of methods of estimation of anthropogenic hazards of thermal stations]. *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of the Saratov State University]. Saratov, Russia, no. 4 (49), issue 1, pp. 176 – 182.

2. Методика прогнозирования масштабов заражения сильнодействующими ядовитыми веществами при авариях (разрушениях) на химически опасных объектах и транспорте: РД 52.04.253-90. – Л.: Гидрометеиздат, 2008. – 19 с.

*Metodika prognozirovaniya masshtabov zarazheniya sil'nodeystvuyushchimi yadovitymi veshchestvami pri avariyaakh (razrusheniyakh) na khimicheskii opasnykh obyektakh i transporte: РД 52.04.253-90* [Methods of prognostication of the scale of contamination with virulent poisonous substances by accidents (implantation damages) on chemically hazardous objects and in transport means: РД 52.04.253-90] (2008). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., Russia, 19 p.

Рекомендовано к публикации канд. хим. наук Н.П. Жильцовым.

Дата поступления рукописи 26.01.2016

*Marina Aleksandrovna Brechalova*, scientific associate; e-mail: [Holstinina\\_M@mail.ru](mailto:Holstinina_M@mail.ru);  
the “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;  
283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38 062) 311-41-16

## MECHANISM OF CHEMICAL CONTAMINATION OF THE ENVIRONMENT WITH SULPHURIC ACID VAPOURS

**Purpose.** To substantiate the reason and mechanism of origin of the chemical contamination in the form of the toxic vapour by accidents as a result of which the sulphuric acid is spilled on the underlying surface.

**Methods.** The comparative analysis of the real scale of the contamination areas because of the sulphuric acid spilled as a result of the rail accident with the prognosis of the contamination areas. The mechanism of origin of the aerosol vapour as a result of spillage of the sulphuric acid on the underlying surface is considered.

**Results.** The dependence of formation of the aerosol cloud of the chemically hazardous substances on the character of the underlying surface and the liquid spilled on it was investigated. The indices that are not taken into account in the existing methods of prognostication of the scale of the contamination areas were determined.

**Scientific novelty.** A number of indices which taking into account will permit to decrease the discrepancy of values of the chemical contamination after the real accidents with its prognosis as much as possible were found out.

**Keywords:** *accident; toxic vapour; sulphuric acid; aerosol; hitting area; underlying surface; chemically hazardous substances.*

**УДК 614.841.332:693.97**

*Елена Ивановна Добрякова, ведущий инж.; e-mail: [kdom100@mail.ru](mailto:kdom100@mail.ru);*

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

*283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. +38 050-283-61-87; (+38 062) 311-41-16*

**ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА**

**Цель.** Определение закономерностей изменения металлоконструкций при пожаре.

**Методика.** Использована структурная схема изучения воздействия на металлические конструкции в условиях пожара внешних и внутренних факторов.

**Результаты.** Представлен анализ резонансных пожаров и лабораторных испытаний металлических конструкций. Рассмотрены основные процессы и параметры, характеризующие изменение свойств металла в условиях пожара.

**Научная новизна.** Систематизированы факторы, влияющие на изменение металлических конструкций каркаса в условиях пожара.

**Практическая значимость.** Полученные результаты можно использовать при проектировании зданий с металлическими каркасами.

**Ключевые слова:** металл; пожар; проектирование зданий; изменение металлоконструкций; дефекты кристаллических решеток.

**Постановка проблемы.** При строительстве зданий широко используют металлические каркасы. Термин «быстровозводимое здание» говорит сам о себе и отмечает преимущества таких зданий. Кроме этого, нужно отметить экономичность постройки и отсутствие серьезных нареканий при эксплуатации. Каркасные здания широко используют в промышленном строительстве, для размещения жилых и общественных объектов. Ряд крупных супермаркетов, складские и производственные здания, жилые дома, киоски – вот неполный перечень таких объектов. Однако, кроме видимых преимуществ, в условиях пожара проявляет себя основная проблема металлических конструкций – низкая огнестойкость.

**Цель работы** – изучение факторов, влияющих на металлические конструкции каркаса в условиях пожара, закономерностей изменения металлоконструкций при пожаре и определение необходимости повышения огнестойкости этих конструкций.

**Изложение материалов исследования.** Металлические конструкции изменяются под воздействием интенсивного высокотемпературного нагревания. Это видно в условиях реальных пожаров (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что металлические конструкции теряют несущую способность в первые минуты после возникновения пожара. Для систематизации происходящих процессов введено понятие огнестойкости, которое отражает время (в минутах), в течение которого конструкция не теряет целостности, несущей и теплоизолирующей способностей. Предел огнестойкости незащищенного металла в основном не превышает 15 мин.

Таблица 1

## Примеры пожаров в зданиях с металлическим каркасом

Дата возникновения пожара	Место возникновения пожара	Изменение металлоконструкций во время пожара	Примечание
17.02.2010	Донецк. Клуб «Вирус»	Огнем уничтожено 1200 м <sup>2</sup> кровли и перекрытий над рестораном Gold, повреждена облицовка здания ночного клуба	Пострадала и спасена одна женщина
3-4.05.2010	Смоленская область. Ярцево. Надстройка мансардного типа на 14 квартир над жилым многоэтажным домом	Металлические конструкции обрушились	Чердачное перекрытие выполнено из гнutoго швеллера, подшитого снизу гипсокартоном, косоуры лестничных маршей металлические
16.07.2011	Москва. Склад Министерства обороны	Металлоконструкции деформировались. Крыша обрушилась	Стены кирпичные. Фермы металлические
19.12.2011	Красноярск. Аэропорт «Черемшанка»	Горела крыша на площади 1200 м <sup>2</sup> . Металлические конструкции кровли обрушились в первую очередь. Огонь распространился на перекрытие. Площадь пожара 2500 м <sup>2</sup>	Стены кирпичные. Фермы металлические. 2-х этажное здание. После пожара здание восстановлению не подлежит
21.02.2012	Город Лесосибирск Красноярского края. Торгово-развлекательный комплекс	Площадь пожара 3360 м <sup>2</sup> . Полностью сгорела трехэтажная пристройка. Металлические конструкции обрушились	Пристройка трехэтажного здания торгово-развлекательного комплекса из металлоконструкций прилегает к основному четырехэтажному панельному зданию магазина «Красный Яр»
12.03.2015	Казань. Торговый комплекс «Адмирал»	Металлические конструкции каркаса здания обрушились в первые минуты пожара	17 человек погибли, 70 человек пострадали, 2 человека пропали без вести. Здание выгорело полностью

Поэтому понимание причин, приводящих к обрушению металлических конструкций, и разработка способов их устранения актуальны. Ключ к пониманию указанных процессов изложен в работах, проводимых Академией Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий под руководством В.Н. Демехина [1], в которых предложена структурная схема (рис. 1) воздействия на металлические конструкции в условиях пожара.



Рис. 1. Схема воздействия на металлические конструкции

Рассмотрим внутренние факторы, определяющие поведение металла в условиях пожара. Согласно предложенной схеме, к таким факторам относятся: физико-механические свойства, технология изготовления, химический состав и структура материала [1-5]. Все физико-механические свойства металлов зависят от кристаллической структуры. При нагревании металла подвижность атомов повышается, расстояние между ними увеличивается, а связи – ослабевают. Термическое расширение материала свидетельствует об увеличении межатомных связей. В строительстве в основном используют сплавы железа с углеродом. Сталь – это сплав, в котором количество углерода не превышает 2 %. Если углерода в сплаве более 2 % – это чугун. Особенностью строения металлов является кристалличность структуры. Строение решетки зависит от вида металла: у железа – (гранцентрированный или объемно-центрированный) куб, у алюминия – гексагональное строение решетки. Расположение атомов в решетке также зависит от вида металла. Для металлов и сплавов характерно наличие дефектов, которые значительно ухудшают механические свойства стали (табл. 2).

Таблица 2

## Дефекты кристаллических решеток металлов

Виды дефектов в кристаллах металлов		
Вид дефекта	Структура дефекта	Причина возникновения
Точечные	Вакансии – пустой узел кристаллической решетки. Межузельные атомы – атомы, перемещенные из узла решетки в межузельное пространство	Вакансии и межузельные атомы есть в кристаллах при любых температурах выше абсолютного нуля из-за тепловых колебаний атомов
Линейные	Краевая дислокация.  Винтовая дислокация	Дислокации возникают за счет нарушения правильного чередования атомных плоскостей при кристаллизации и в результате слипания большого количества вакансий
Поверхностные	Поверхностные дефекты образуются в более крупных структурах металла (например, на границах зерен), которые могут быть сориентированы в пространстве различным способом	

По мере увеличения количества дефектов прочность металла падает. Количество дефектов находится в прямо пропорциональной зависимости от интенсивности высокотемпературного нагревания. При температуре плавления первоначальная кристаллическая решетка разрушается вследствие критического количества дефектов, максимального увеличения межатомных расстояний и увеличения связей. Металл переходит из твердого состояния в жидкое.

Проанализируем внутренние факторы, действующие на металл в условиях пожара [1-5], с учетом особенностей их кристаллической структуры (табл. 3).

К основным свойствам, характеризующим поведение металла в условиях пожара, относятся физические, механические и теплофизические свойства. К физическим свойствам металла, характеризующим его поведение при пожаре, относится плотность.

К механическим свойствам относятся прочность и деформирование. Чем больше напряжение, способное появиться в материале, тем он прочнее. В том случае, когда сумма внутренних сил меньше внешней силы  $F_p$ , происходит разрушение материала, точнее, потеря целостности. Напряжение, соответствующее разрушающей силе, называется пределом прочности  $R$ .

Предел упругости  $\sigma_y$  – максимальное напряжение, при котором в материале еще не возникает остаточных деформаций.

Таблица 3

## Внутренние факторы, действующие на металл в условиях пожара

Фактор	Вид	Свойства	Примечание
Технология изготовления	Горячая прокатка  Термическое упрочнение Холодная протяжка	Для повышения прочности подвергают термической и механической обработке	Стали, прошедшие закалку, имеют повышенную прочность и твердость, но склонны к хрупкому разрушению
Химический состав	Сталь: • углеродистая  • низколегированная	При нагревании: • горячекатаной углеродистой стали уменьшается ее прочность и увеличивается текучесть • низколегированной стали до 300 °С происходит увеличение прочности, которая сохраняется после остывания	Устойчивость к высоким температурам: • углеродистые стали без дополнительного упрочнения обладают меньшей устойчивостью, чем низколегированные, еще хуже – стали, упрочненные термическим способом, менее всего устойчивы стали, упрочненные наклепом • низколегированные стали обладают наибольшей устойчивостью благодаря легирующим добавкам С повышением объемной доли углерода твердость стали увеличивается, пластичность уменьшается. Упругость стали изменяется мало
Физико-механические свойства	Прочность  Упругость, пластичность Деформация  Разрушение	Объясняется наличием силы, удерживающей атомы в определенных местах кристаллической решетки  Упругая – обратимое смещение атомов кристаллической решетки от положения равновесия Пластическая – деформация после прекращения вызвавших ее напряжений  Хрупкое  Вязкое	По мере увеличения количества дефектов прочность снижается. При повышении температуры: прочность и упругость уменьшаются, пластичность увеличивается В основе деформации лежит обратимое смещение атомов кристаллической решетки от положения равновесия  В основе деформации лежит перемещение дислокаций при любых температурах. Пластическую деформацию вызывает касательное напряжение. В результате нее может произойти вязкое разрушение Отрыв одних слоев атомов от других под действием нормальных растягивающих напряжений Путем среза под действием касательных напряжений. Ему предшествует значительная пластическая деформация
Структура	В твердом состоянии сталь – поликристаллическое тело, состоящее из различно ориентированных зерен	Размер и форма зерен любого металла не являются постоянными и изменяются в зависимости от вида обработки Структура стали зависит от условий кристаллизации, химического состава, режима термообработки и прокатки	При температуре не выше 720 °С в углеродистых сталях, находящихся в отожженном состоянии, могут быть зерна трех типов: феррита, цементита и перлита Одновременно в одной стали могут быть следующие комбинации зерен: феррита и перлита; только перлита; перлита и цементита. Сочетание зерен в стали зависит от объемной доли в ней углерода



При упругой деформации справедлив закон Гука, устанавливающий прямо пропорциональную зависимость между напряжением и деформацией:

$$\sigma_y = E\epsilon, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости (модуль Юнга), Па;  
 $\epsilon$  – относительная деформация;

$$\epsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0}, \quad (2)$$

$l_1$  – длина образца после растяжения, м;

$l_0$  – длина образца до растяжения, м.

Предел текучести  $\sigma_T$  – постоянное напряжение при нарастании пластической деформации.

Деформация изделий происходит при изгибе, кручении, растяжении, сжатии (рис. 2). Она может быть обратимой и необратимой. На деформацию влияют степень нагрузки и скорость ее повышения, а также температура материала. Как правило, с понижением скорости нагрузки либо с повышением температуры материала деформация увеличивается. Пластическая деформация, медленно нарастающая в течение длительного времени под воздействием нагрузки, которая недостаточна для того, чтобы вызвать остаточную деформацию за обычные периоды наблюдений, называется деформацией ползучести, а процесс такого деформирования – ползучестью (крапом).

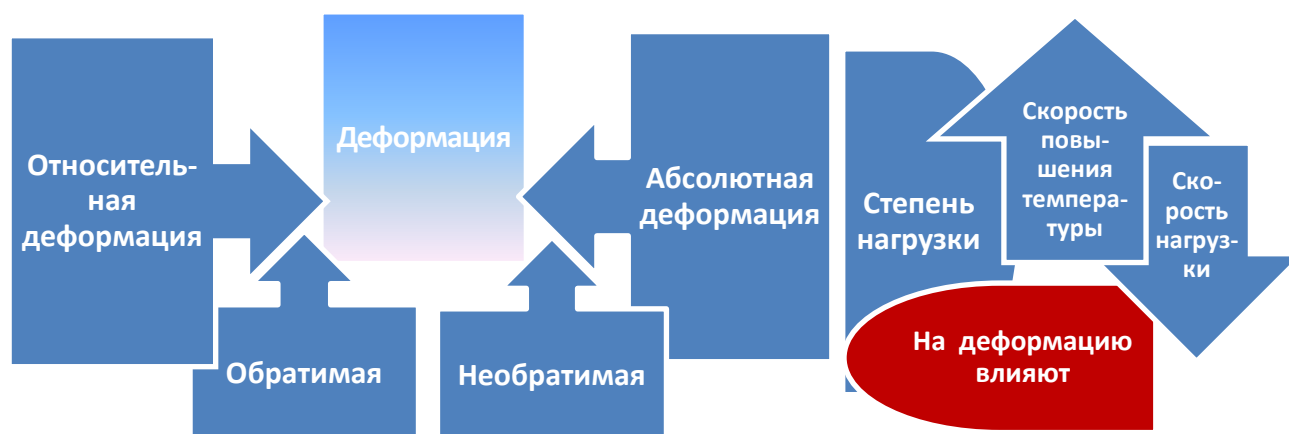


Рис. 2. Виды деформаций

**Твердость металлов** определяют числом Бриннеля, которое предоставляет собой отношение силы, вдавливающей металлический закаленный шарик, к площади полученного при испытании углубления.

Теплофизические свойства: теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность, теплостойкость, тепловое расширение – характеризуют поведение материала при воздействии на них теплоты.

Коэффициент теплопроводности материала  $\lambda$ , Вт/(м·К), характеризует его способность проводить тепловой поток, возникающий вследствие разности температур на противоположных поверхностях образца (изделия):

$$\lambda = \frac{Q\tau}{\delta S\Delta t}, \quad (3)$$

где  $Q$  – теплота, переданная от обогреваемой поверхности к холодной, Дж;

$\tau$  – время, с;

$\delta$  – толщина образца (изделия), м;

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

$\Delta t$  – разность температур противоположных поверхностей образца, К.

Коэффициент теплопроводности  $\lambda$  для стали равен 58 Вт/(м·К).

Способность материала при нагревании поглощать определенное количество теплоты, при остывании – ее отдавать характеризует удельная теплоемкость:

$$C = \frac{q}{m\Delta t}, \quad (4)$$

где  $C$  – удельная теплоемкость; для стали удельная теплоемкость равна 0,42 Дж/(кг·К);

$m$  – масса материала, кг;

$\Delta t$  – разность температур до и после нагревания, К.

Температуропроводность – способность образца материала изменять температуру при нагревании (охлаждении); характеризуется коэффициентом температуропроводности  $\alpha$ , м<sup>2</sup>/с, который отражает скорость изменения температуры материала:

$$\alpha = \lambda/c\rho_0, \quad (5)$$

где  $\rho_0$  – плотность материала, кг/м<sup>3</sup>.

Тепловое расширение твердых материалов характеризуют коэффициенты линейного и объемного теплового расширения.

В результате воздействия пожара в металлических конструкциях происходит ряд негативных процессов. Вследствие превращения тепловой энергии атомов в кинетическую их подвижность возрастает по мере повышения температуры материала. В процессе теплопереноса увеличиваются межатомные расстояния, снижается предел прочности и упругости, пластичность увеличивается. Несущая способность конструкции резко снижается (табл. 4).

Таблица 4

## Негативные процессы в металлических конструкциях при пожаре

Наименование	Вид	Причины возникновения	Примечание
Накопление дефектов	В статической теории разрушения основной показатель – предел прочности. Его легко определить экспериментально, меняется при изменении температуры	Под разрушением подразумевается мгновенный акт, которому лишь предшествует процесс роста напряжений в материале. Однако с его структурами и свойствами ничего не происходит	Предел прочности используют при расчетах изменения несущей способности конструкций в условиях пожара (статическая часть огнестойкости конструкций)
	Кинетическая теория разрушения основана на явлении статической усталости	При статическом нагружении образца вне зависимости от действующего напряжения происходит разрушение образца тем быстрее, чем больше напряжение	Разрушение представляет собой необратимый кинетический процесс постепенного накопления внутренних повреждений (дефектов) структуры материала, ускоряемых температурой
Структурные изменения	Аллотропические изменения структуры сталей	Изменяется тип кристаллической решетки, наблюдается тепловой эффект, свойства изменяются скачком. В некоторых случаях, например при быстром охлаждении, может одновременно существовать несколько типов решеток	Обычно каждый тип решетки устойчив при определенном интервале температур
Размягчение	Характеризуется температурой размягчения		Повышение пластичности при повышении температуры в нагруженном состоянии способствует развитию ползучести
Плавление	Изменение агрегатного состояния – фазовый переход из твердого состояния в жидкое при температуре плавления		Прочность снижается до нуля

**Выводы.** Для сохранения целостности металлического каркаса необходимыми характеристиками являются предел прочности и модуль упругости. Результаты испытаний металлических конструкций на огнестойкость показывают, что при повышении температуры от 20 до 300 °С предел прочности некоторых марок сталей увеличивается за счет снижения технологических напряжений. Увеличение температуры способствует снижению модуля упругости, следовательно, увеличению деформирования. Деформация стали зависит от ее марки, степени нагружения конструкции, от температуры воздействия нагревающей среды и коэффициента теплообмена между нагревающей средой и металлической конструкцией. Физико-механические свойства сталей можно увеличить за счет введения в состав легирующих добавок. На механические свойства сталей влияет объемная доля

углерода: чем она выше, тем выше твердость и ниже пластичность; упругость меняется незначительно: предел прочности увеличивается до объемной доли углерода 0,8...1,0 %, а затем снижается. Чем ниже температура плавления металла, тем при более низких температурах происходит снижение прочности. При температуре выше 400 °С происходит резкое необратимое снижение предела прочности. Нагрузка усиливает температурную ползучесть металла, ускоряет процесс разрушения образцов и снижает температуру достижения их предельных состояний. Установленные закономерности поведения металлических конструкций при высокотемпературных режимах пожара свидетельствуют о необходимости определения фактической огнестойкости металлических конструкций каркаса зданий с учетом технологии изготовления, химического состава и физико-механических свойств используемых сплавов. Для приведения в соответствие фактической огнестойкости металлических конструкций нормируемой необходимо проведение огнезащитных работ.

### Список литературы / References

1. Здания, сооружения и их устойчивость при пожаре / В.Н. Демехин, И.Л. Мосалков, Г.Ф. Плюснина и др. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2003. – 616 с.

Demekhin, V.N., Mosalkov, I.L., Plyusnina, G.F. etc. (2003). *Zdaniya, sooruzheniya i ikh ustoychivost pri pozhare* [Buildings, installations and their stability by the fire]. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, Russia, 616 p.

2. Востров В.К., Пресняков Н.И. Актуализация строительных норм и механическая безопасность строительных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. – 2011. – № 6. – С. 6 – 10.

Vostrov, V.K., Presnyakov, N.I. *Aktualizatsiya stroitel'nykh norm i mekhanicheskaya besopasnost stroitel'nykh konstruktsiy* [Actualization of building norms and mechanical safety of building structures]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2011, no. 6, pp. 6 – 10.

3. Назаров Ю.П., Городецкий А.С., Симбиркин В.Н. К проблеме обеспечения живучести строительных конструкций при аварийных воздействиях // Строительная механика и расчет сооружений. – 2009. – № 4. – С. 5 – 9.

Nazarov, Yu.P., Gorodetskiy, A.S., Simbirkin, V.N. *K probleme obespecheniya zhivuchesti stroitel'nykh konstruktsiy pri avariynykh vozdeystviyakh* [To a problem of guaranteeing the survivability of building structures by accidental influences]. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy* [Structural mechanics and analysis of structures], 2009, no. 4, pp. 5 – 9.

4. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. – М.: Пожарная безопасность и наука, 2001. – 382 с.

Roytman, V.M. (2001). *Inzhenernyye resheniya po otsenke ognestoykosti proyektiruyemykh i rekonstruiruyemykh zdaniy* [Engineering decisions on estimation of buildings being projected and re-constructed]. Moscow: Pozharnaya bezopasnost i nauka Publ., Russia, 382 p.

5. Одесский П.Д. О теории прочности и эффекте второй нагрузки применительно к стальным строительным конструкциям // Промышленное и гражданское строительство. – 2013. – № 10. – С. 20 – 24.

Odesskiy, P.D. *O teorii prochnosti i effekte vtoroy nagruzki primenitel'no k stal'nyim stroitel'nyim konstruksiyam* [About the strength theory and the second-load effect with regard to the steel building structures]. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo* [Industrial and civil engineering], 2013, no. 10, pp. 20 – 24.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребенкиным.  
Дата поступления рукописи 03.03.2016

*Yelena Ivanovna Dobryakova*, leading engineer; e-mail: [kdom100@mail.ru](mailto:kdom100@mail.ru);  
the “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;  
283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phones (+38 050) 283-61-87; (+38 062) 311-41-16

## CHANGE OF PROPERTIES OF METALS UNDER FIRE CONDITIONS

**Purpose.** Disclosure of laws of change of metal constructions by the fire.

**Methods.** The structural schematic diagram of the study of influence of internal and external factors on the metal constructions under the fire conditions is used.

**Results.** The analysis of the resonance fires and laboratory tests of the metal constructions is presented. The basic processes and parameters characterizing the changes of the properties of the metal under the fire conditions are examined.

**Scientific novelty.** The factors having an influence on the change of the metal constructions under the fire conditions are systematized.

**Practical value.** One can use the results received by the projecting of the buildings with metal structures.

**Keywords:** *metal; fire; projecting of the buildings; change of metal constructions; crystal imperfections.*

### III. Охрана труда

УДК 614.847.79:62-82-181.4

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

*Александр Витальевич Чапкович, науч. сотр.; e-mail: [niigd.osmas-2@mail.ru](mailto:niigd.osmas-2@mail.ru);*

*Наталья Анатольевна Выпирайло, техник I кат.; e-mail: [niigd.osmas-6@mail.ru](mailto:niigd.osmas-6@mail.ru);*

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;  
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-71-29; 311-12-00*

## ЭРГОНОМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РУЧНОГО ГИДРАВЛИЧЕСКОГО НАСОСА

**Цель.** Определение силы, которую необходимо прилагать к приводной рукоятке в процессе работы с насосом для создания максимального давления в гидросистеме, и давления, которое будет развивать насос при допустимой длительной нагрузке на оператора согласно требованиям гигиенических норм.

**Методы.** Расчет основных эргономических характеристик разрабатываемого ручного гидравлического насоса НГМ80.

**Результаты.** Определена сила, которую необходимо прилагать к приводной рукоятке в процессе работы с насосом при давлении в гидросистеме 80 МПа, и давление, которое будет развивать насос при допустимой длительной нагрузке на оператора.

**Практическая значимость.** Увеличение рабочего давления в гидросистеме позволит уменьшить конструктивные параметры гидроинструмента без уменьшения силовых характеристик. Полученные данные помогут рассчитать конструктивные параметры гидравлических инструментов с целью обеспечения оптимальных нагрузок на спасателей.

**Ключевые слова:** *ручной насос; гидросистема; усилие; давление; нагрузка.*

**Введение.** Ликвидация последствий разрушения зданий, сооружений, обрушения горных пород связана с проведением работ по разрезанию стальных стержней и строительной арматуры, подъему и перемещению крупногабаритных грузов (балок, плит, оборудования и пр.), извлечению из обрушенных масс оборудования, элементов конструкций. Данные работы зачастую проводят в стесненных условиях при отсутствии стационарных источников энергопитания. При ведении аварийно-спасательных работ практически в любых условиях весьма эффективно используют ручной гидроинструмент с автономным источником питания.

НИИГД «Респиратор» ведет научно-исследовательскую работу по созданию комплекса средств малой механизации для ведения спасательных работ, предназначенного для внедрения в подразделения МЧС взамен ранее разработанных гидравлических инструментов [1]. В качестве источника автономного питания для ручного гидроинструмента предполагают использовать ручной гидравлический насос двустороннего действия НГМ80, который предназначен для подачи рабочей жидкости в приводные

гидроцилиндры инструментов. Создаваемое разрабатываемым насосом более высокое максимальное давление (80 МПа) позволит уменьшить габариты и массу гидроинструментов без уменьшения развиваемого усилия.

Максимальное рабочее давление дает определенные преимущества разрабатываемому насосу перед насосами ведущих производителей подобного гидравлического оборудования, таких, как Holmatro, «Энерпред», Enerpac, в которых используется максимальное рабочее давление в пределах от 70 до 72 МПа. Ввиду того, что усилие, создаваемое на рабочих органах гидравлических инструментов одного типа разных производителей при разрезании (перекусывании) металлической арматуры, подъеме (перемещении) крупногабаритных грузов примерно одинаково, увеличение рабочего давления в гидросистеме позволит уменьшить конструктивные параметры гидроинструмента без уменьшения силовых характеристик. Минимизация габаритов и массы аварийно-спасательных инструментов – актуальная задача разработчиков подобного оборудования.

**Цель работы.** Расчет силы, которую необходимо прилагать к приводной рукоятке в процессе работы с насосом для создания максимального давления в гидросистеме, и определение давления, которое будет развивать насос при допустимой длительной нагрузке согласно требованиям гигиенических норм.

**Материал исследования.** Гидравлическая схема насоса (рис. 1) должна быть выполнена по принципу автоматического отключения низкого давления за счет открывания всасывающего канала при достижении давления в нагнетательной линии установленного значения 6,5 МПа. Реализация такой схемы позволит добиться наименьшего сопротивления на рукоятке во всех режимах работы. Насос приводит в действие мускульная сила оператора, поэтому важный эргономический показатель – сила, прилагаемая к рукоятке в процессе работы с насосом.

Расчет проводят для положения рукоятки, соответствующего наименее благоприятным, с точки зрения приложения силы, условиям работы. Это точка положения рукоятки, в которой сведены к минимуму зазоры в шарнирах, закрыты всасывающие клапаны, давление под плунжером равно максимальному давлению в гидросистеме 80 МПа (ориентировочно – 1/3...1/5 от верхнего положения плунжера) (рис. 2).

Расчет выполняют из условия равенства крутящих моментов.

Уравнение крутящих моментов имеет вид

$$F l = P_r \varrho + P_{тр} \varrho + M_{тр}, \quad (1)$$

где  $F$  – сила, прилагаемая к рукоятке, Н;

$l$  – длина рабочей части рукоятки, мм ( $l = 580$  мм);

$P_r$  – сила сопротивления плунжера, Н;

$\varrho$  – расстояние между осью вращения рукоятки и осью плунжера, мм ( $\varrho = 26$  мм);

$P_{тр}$  – сила трения уплотнительного кольца на плунжере, Н;

$M_{тр}$  – момент, возникающий под действием силы трения между скобой и проушиной рукоятки, Н·мм.

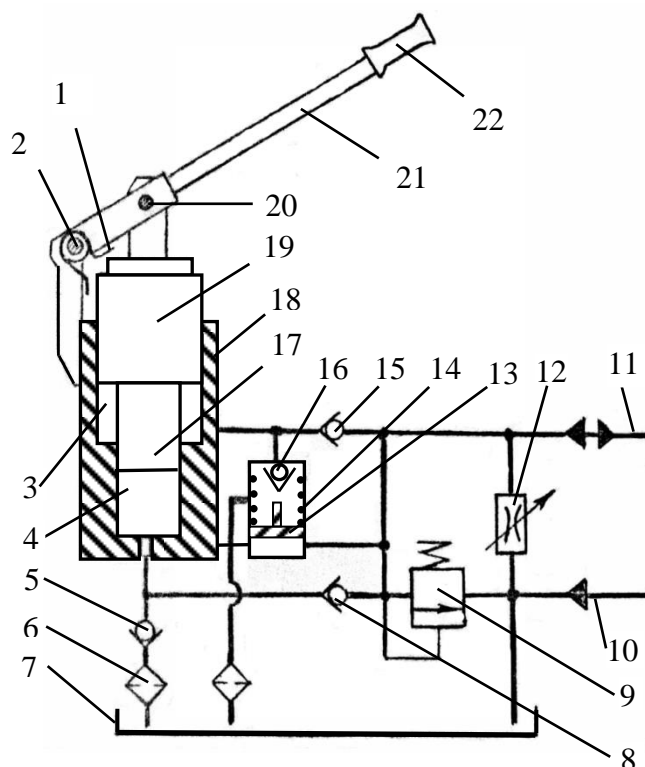


Рис. 1. Гидравлическая схема насоса НГМ80:

1 – пружина кручения; 2 – ось; 3 – поршневая камера; 4 – плунжерная камера; 5 – всасывающий клапан плунжера; 6 – фильтр; 7 – бак; 8 – нагнетательный клапан плунжера; 9 – предохранительный клапан; 10 – сливная магистраль; 11 – нагнетательная магистраль; 12 – вентиль; 13 – толкатель; 14 – пружина; 15 – нагнетательный клапан поршня; 16 – всасывающий клапан поршня; 17 – плунжер; 18 – корпус; 19 – поршень; 20 – ось; 21 – рычаг; 22 – рукоятка

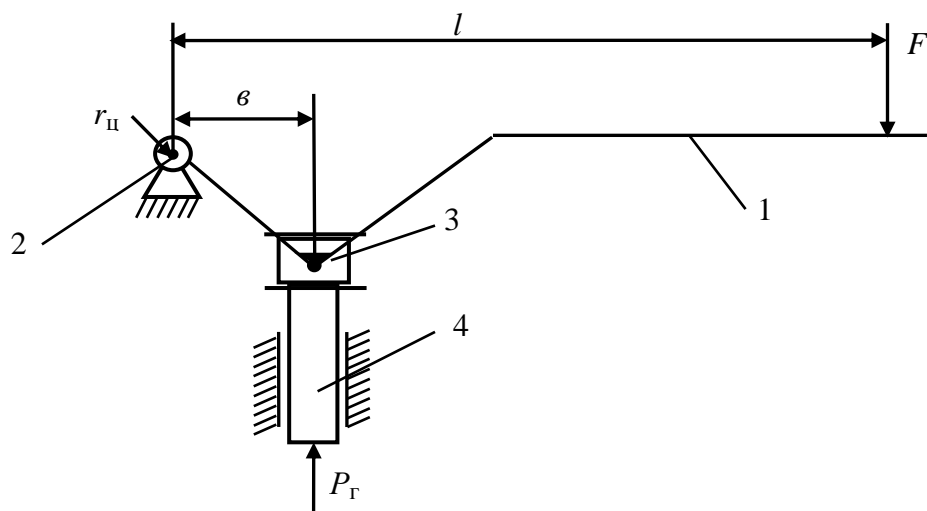


Рис. 2. Кинематическая схема насоса:

1 – рукоятка; 2 – ось вращения рукоятки; 3 – ось плунжера; 4 – плунжер;  $P_г$  – сила сопротивления плунжера;  $b$  – расстояние между осью вращения рукоятки и осью плунжера;  $r_ц$  – радиус оси вращения рукоятки;  $l$  – длина рабочей части рукоятки;  $F$  – сила, прилагаемая к рукоятке



Преобразуя выражение (1), получаем

$$F = \frac{P_{\Gamma B} + P_{\text{тр}} \rho + M_{\text{тр}}}{l}. \quad (2)$$

Сила сопротивления плунжера при максимальном давлении в напорной магистрали равна [2]

$$P_{\Gamma} = \frac{\pi d_{\text{пн}}^2}{4} \rho = \frac{\pi \cdot 12^2}{4} \cdot 80 = 9043 \text{ Н}, \quad (3)$$

где  $d_{\text{пн}}$  – наружный диаметр плунжера, мм ( $d_{\text{пн}} = 12$  мм);

$\rho$  – максимальное давление в напорной магистрали, МПа;  $\rho = 80$  МПа.

Силу трения уплотнительного кольца, нагруженного давлением,  $P_{\text{тр}}$ , Н, определяют по формуле [2]

$$P_{\text{тр}} = S_{\text{к}} \rho f, \quad (4)$$

где  $S_{\text{к}}$  – площадь контакта уплотнительного кольца, мм<sup>2</sup>;

$f$  – коэффициент трения;  $f = 0,08$  [2].

Площадь контакта уплотнительного кольца  $S_{\text{к}}$ , мм<sup>2</sup>, определяют по формуле

$$S_{\text{к}} = \pi d_{\text{пн}} l_{\text{к}}, \quad (5)$$

где  $l_{\text{к}}$  – длина контакта уплотнительного кольца, мм.

Длину контакта уплотнительного кольца  $l_{\text{к}}$ , мм, определяют по формуле

$$l_{\text{к}} = 0,8 d_{\text{к}}, \quad (6)$$

где  $d_{\text{к}}$  – диаметр уплотнительного кольца в поперечном сечении, мм;  $d_{\text{к}} = 2,5$  мм.

Таким образом,  $P_{\text{тр}}$  определяют из выражения

$$P_{\text{тр}} = \pi d_{\text{пн}} \cdot 0,8 d_{\text{к}} \rho f = 482,3 \text{ Н}. \quad (7)$$

Момент трения  $M_{\text{тр}}$ , Н·мм, возникающий при движении рукоятки относительно скобы корпуса насоса, определяют из выражения

$$M_{\text{тр}} = F_{\text{тр}} r_{\text{ц}}, \quad (8)$$

где  $F_{\text{тр}}$  – сила трения, возникающая на оси при движении рукоятки относительно скобы корпуса насоса (опоры), Н;

$r_{\text{ц}}$  – радиус оси вращения рукоятки, мм ( $r_{\text{ц}} = 5$  мм).

Силу трения  $F_{\text{тр}}$  определяют исходя из рис. 3.

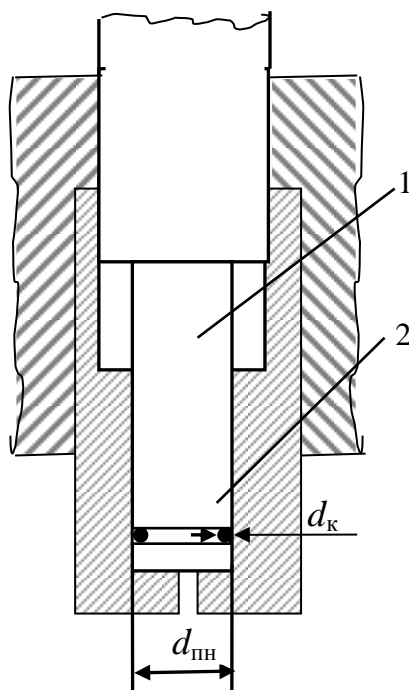


Рис. 3. Общий вид плунжера:

1 – плунжер; 2 – уплотнительное кольцо;  $d_{\text{к}}$  – диаметр уплотнительного кольца в поперечном сечении;  $d_{\text{пн}}$  – диаметр плунжера

Силу трения  $F_{\text{тр}}$ , Н, определяют по формуле

$$F_{\text{тр}} = F_{\text{оп}} f_s, \quad (9)$$

где  $F_{\text{оп}}$  – сила, возникающая в опоре под действием  $P_{\text{г}}$  и  $P_{\text{тр}}$ , Н;

$f_s$  – коэффициент трения стальных пар;  $f_s = 0,12$  [3].

$F_{\text{оп}}$  определяют из выражения

$$F_{\text{оп}} = \frac{(P_{\text{г}} + P_{\text{тр}})(l - b)}{l}. \quad (10)$$

Таким образом,

$$M_{\text{тр}} = \frac{(P_{\text{г}} + P_{\text{тр}})(l - b)}{l} f_s r_{\text{ц}} = 5458,8 \text{ Н} \cdot \text{мм}. \quad (11)$$

Подставляя результаты вычислений (3), (7), (11) в (2), получаем значение силы на рукоятке:  $F = 436,3$  Н.

Ввиду того, что работает гидроинструмент при максимальном давлении кратковременно и циклично, полученное в результате расчета максимальное значение силы на рукоятке (436,3 Н) можно считать допустимым.

Однако согласно гигиенической оценке условий труда по тяжести и интенсивности трудового процесса при длительной (постоянной) работе допустима сила 350 Н. Определим давление, которое будет развивать насос при приложении оператором такой силы к рукоятке насоса. Для этого преобразуем уравнение (2), используя (3), (7), (11), и подставим полученные расчетные данные:

$$P = \frac{Fl}{b + \left(1 - \frac{b}{l}\right) f_s r_{\text{ц}}} : \left( \frac{\pi d_{\text{пн}}^2}{4} + \pi d_{\text{пн}} \cdot 0,8 d_{\text{к}} f \right) = 64,1 \text{ МПа.} \quad (12)$$

Таким образом, можно отметить, что работа в длительном режиме на разрабатываемом ручном гидравлическом насосе при приложении оператором силы до 350 Н обеспечит создание давления в гидросистеме до 64 МПа.

**Вывод.** В результате проведенных расчетов определено значение силы, прилагаемой оператором к рукоятке ручного гидравлического насоса для создания максимального давления в гидросистеме. Для работы в длительном режиме необходимо рассчитывать на давление не более 64 МПа. Эти данные помогут рассчитать конструктивные параметры гидравлических инструментов, которые войдут в разрабатываемый комплекс средств малой механизации, с целью обеспечения оптимальных нагрузок на спасателей при работе с ними.

### Список литературы / References

1. Каледин Н.В., Пейтибай Г.И., Чайковская Э.Г. Средства малой механизации, автоматики и связи для горноспасателей и шахтеров // Уголь Украины. – 2008. – № 12. – С. 42 – 45.

Kaledin, N.V., Peftibay, G.I., Chaykovskaya, E.G. *Sredstva maloy mekhanizatsii, avtomatiki i svyazi dlya gornospasateley i shakhtyerov* [Small-scale mechanization, automatic and communication means for mine rescuers and miners]. *Ugol' Ukrainy* [Coal of the Ukraine], 2008, no. 12, pp. 42 – 45.

2. Детали машин / под ред. О.А. Ряховского. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 544 с.

Ryakhovskiy, O.A. (ed.) (2002). *Detali mashin* [Mashine elements]. Moscow: MGTU im. N.E. Bauman Publ., Russia, 544 p.

3. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. – 9-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 2006. – Т. 1. – 731 с.

Anur'yev, V.I. (2006). *Spravochnik konstruktora-mashinostroitelya: v 3 t.* [Reference book of the constructor-mechanical engineer: in 3 volumes]. 9th rev. and suppl. ed. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., Russia, vol. 1, 731 p.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В.Г. Богатырёвым.  
Дата поступления рукописи 26.01.2016

*Georgiy Ivanovich Pefitbay*, head of department; e-mail: [niigd.osmas-1@mail.ru](mailto:niigd.osmas-1@mail.ru);  
*Aleksandr Vital'yevich Chapkovich*, scientific associate; e-mail: [niigd.osmas-2@mail.ru](mailto:niigd.osmas-2@mail.ru);  
*Natal'ya Anatol'yevna Vypiraylo*, technician of the first category; e-mail: [niigd.osmas-6@mail.ru](mailto:niigd.osmas-6@mail.ru)  
the "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection  
of the MChS DNR;  
283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phones (+38 062) 311-71-29; 311-12-00

## ERGONOMIC CHARACTERISTICS OF A HAND-OPERATED HYDRAULIC PUMP

**Purpose.** Determination of the force that should be applied to an actuator handle in the process of the pumping to create the maximum pressure in a hydraulic system and the pressure that will develop the pump by the permissible long-term load on the operator in accordance with demands of hygienic standards.

**Methods.** Calculation of the principal ergonomic characteristics of the hand-operated hydraulic pump HГМ80 being developed.

**Results.** The force that should be applied to the actuator handle in the process of the pumping at a pressure in the hydraulic system of 80 MPa, and the pressure that will develop the pump by the permissible long-term load on the operator are determined.

**Practical value.** The increase of the operating pressure in the hydraulic system will permit to decrease the design parameters of the hydraulic tool without reduction of the load bearing characteristics. The data received will be of help to calculate the design parameters of the hydraulic tools for the purpose of guaranteeing the optimum loads on the rescuers.

**Keywords:** *hand-operated pump; hydraulic system; force; pressure; load.*

УДК [543.2:543.429.23]:552.57

*Игорь Григорьевич Костенко, науч. сотр.; e-mail: [cactus47@mail.ru](mailto:cactus47@mail.ru);  
Евгений Павлович Сапунов, науч. сотр.; e-mail: [evgeniy.sapunov@mail.ru](mailto:evgeniy.sapunov@mail.ru);  
Юрий Александрович Службин, завотделом; e-mail: [sluzba@gmail.com](mailto:sluzba@gmail.com);  
Татьяна Васильевна Борщ, и.о. науч. сотр.; e-mail: [tatyanadnr@mail.ru](mailto:tatyanadnr@mail.ru);  
Государственное учреждение «Институт физики горных процессов»;  
283114, Донецк, ул. Розы Люксембург, 72. Тел. (+38 062) 311-52-85*

## ЛАБОРАТОРНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ СПЕКТРОМЕТР ЯМР

**Цель.** Создание макета лабораторного портативного спектрометра ЯМР.

**Методика.** Использование ЯМР-спектров угольного вещества для исследования фазового состояния воды и метана в горных породах.

**Результаты.** Создан макетный образец лабораторного портативного спектрометра ЯМР и проведены его испытания.

**Новизна.** Малые габариты и масса прибора позволяют расширить применение методик ЯМР в лабораториях.

**Практическая значимость.** Разработка позволяет расширить применение методик ЯМР при изучении угольного вещества и сделать их более доступными для исследовательских лабораторий.

**Ключевые слова:** *спектрометр ЯМР; свойства угольного вещества; фазовое состояние воды и метана в угольном веществе.*

**Анализ последних исследований.** Ядерный магнитный резонанс (ЯМР) уже в течение многих лет является мощным и информативным инструментом для исследования свойств различных веществ.

В Институте физики горных процессов методы ЯМР-спектроскопии широко используют при исследованиях структуры ископаемых углей уже более 20 лет. В частности, их применяют для изучения фазового состояния воды и метана в горных породах [1]. Анализ формы и ширины сигнала ЯМР позволяет разделять содержащуюся в угле воду на свободную и физически связанную, а также оценивать фазовое состояние метана. При этом обнаруживается корреляция параметров линии ЯМР со степенью выбросо- и взрывоопасности горных пород [2].

Применяемые в настоящее время в институте спектрометры ЯМР созданы еще в 90-х годах XX в. Они представляют собой громоздкий комплекс, состоящий из магнитной системы (постоянный магнит или электромагнит) и стандартной аппаратной стойки (высотой около 2 м), на которой установлен комплекс приборов стандартных (заводского изготовления) и собственной разработки.

Причем, если приборы собственной разработки изготавливали именно для данной установки, то в промышленных приборах, как правило, используют только отдельные их функции.

Многочисленные межблочные кабельные и разъемные соединения, разъемные соединения внутри блоков и механические органы коммутации и управления значительно снижают надежность и стабильность работы измерительных установок. Точность и стабильность результатов измерений значительно снизились. Громоздкие и тяжелые магниты (массой до 0,5...1 т) – дополнительный источник нестабильности вследствие невысокой термостабильности, а их термостабилизация вызывает большие сложности.

Моральное и физическое устаревание существующих исследовательских установок вызвали необходимость разработки концепции и создания прибора нового поколения, малогабаритного и функционального.

**Постановка задачи.** В качестве аванпроекта была сформулирована концепция нового прибора и на ее основе создан действующий макет лабораторного портативного спектрометра ЯМР широких линий для исследования угольного вещества.

1. Прибор должен быть малогабаритным и легким, размещаться на обычном рабочем столе, что позволит легко перемещать его при необходимости на другое рабочее место.

2. Прибор должен содержать минимальное количество отдельных блоков, механических регулирующих и коммутационных элементов, а также кабельных и разъемных соединений.

3. Все операции по управлению работой прибора, его конфигурированию и настройке, а также вся обработка результатов измерений должны осуществляться компьютером посредством специально написанного (проприетарного) программного обеспечения.

4. Аппаратный блок должен сопрягаться с компьютером через стандартный универсальный интерфейс, что позволит подключить его практически к любому компьютеру (ноутбук, десктоп, промышленный компьютер). Это сделает прибор более универсальным и мобильным, более гибким в применении, достаточно установить на используемый компьютер специализированное программное обеспечение.

5. Программное обеспечение должно быть создано в широко распространенной и доступной среде разработки и позволять сравнительно легко модифицировать и дорабатывать его.

Кроме того, перед разработчиками ставились следующие задачи:

- максимально упростить и автоматизировать процесс измерения и обработки результатов (что снижает требования к квалификации предполагаемого обслуживающего персонала);

- перенести максимально возможное количество функций управления и обработки в компьютерную часть прибора;

- предусмотреть три основных режима работы

«разработчик» – предусматривающий полный доступ ко всем возможностям и функциям прибора;

«эксперт» – для работы квалифицированного специалиста, допускающий расширенные возможности управления и настройки;

«лаборант» – минимальные возможности по настройке прибора, обеспечивающие рутинные измерения.

Конструкция прибора: моноблок с возможностью подключения внешнего компьютера.

**Результаты исследований.** Исходя из вышеописанной концепции разработан, изготовлен и испытан макет лабораторного портативного спектрометра ЯМР (рис. 1, 2):

- использован малогабаритный постоянный магнит (специально разработан и изготовлен для применения в портативном ЯМР-спектрометре);
- поле магнита в рабочей зоне равно 2,72 кЭ, что соответствует рабочей частоте на ядрах водорода 11,58 МГц;
- развертка осуществляется по частоте. Диапазоны развертки от  $\pm 100$  до  $\pm 7,5$  кГц;
- модуляция поля – встроенными катушками, в диапазоне от 0,001 до 2,5 Э;
- диаметр отверстия для образцов 5 мм.

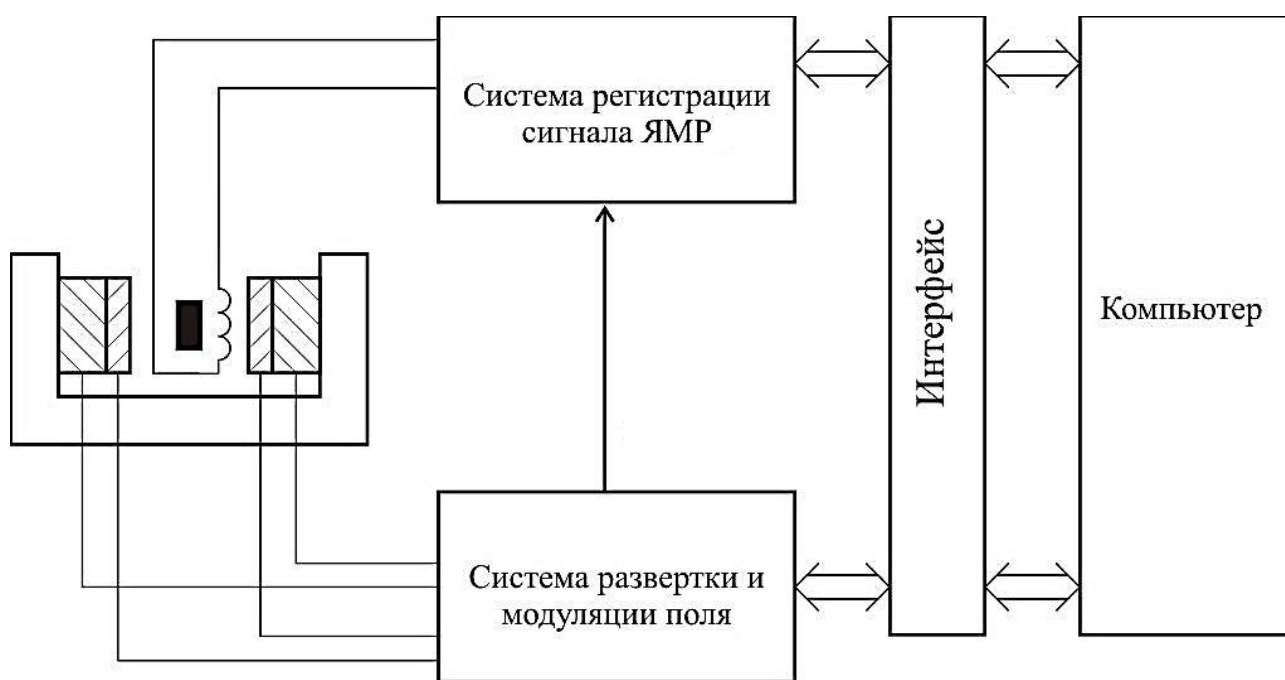


Рис. 1. Структура спектрометра ЯМР широких линий для исследования углей

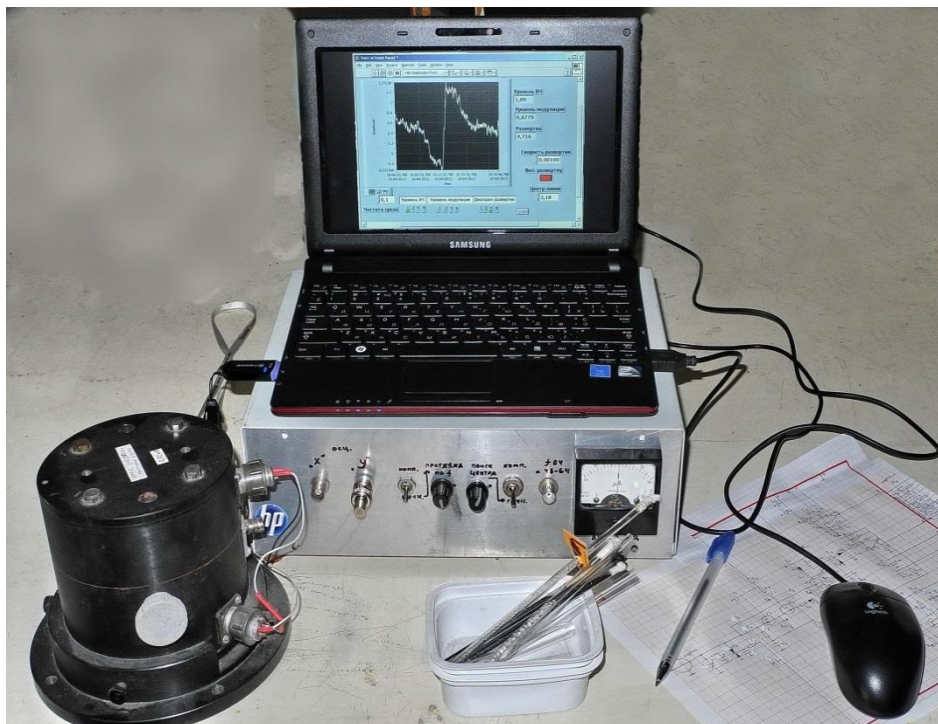


Рис. 2. Макет лабораторного портативного спектрометра

**Аналоговая часть** спектрометра построена по классической схеме с автодинным генератором, системой АРУ и фазовым детектированием.

**Автодинный генератор** построен по схеме Паунда-Найта, позволяющей управлять амплитудой генерации в широких пределах (от 10 до 200 мВ)

**Частота автодина** 11,58 МГц, с возможностью грубой и плавной регулировки вручную или с помощью компьютера.

**Управление амплитудой автодина** – автоматическое (управляет компьютер) и ручное (управляет оператор).

**Фазовый детектор** служит для эффективного выделения сигнала, сужая полосу пропускания тракта регистрации сигнала, что повышает соотношение сигнал/шум и улучшает чувствительность тракта. Дополнительная фильтрация сигнала осуществляется при обработке сигнала в компьютере программными средствами.

В качестве компьютерного интерфейса (устройства согласования между аналоговой частью и компьютером) применено устройство ввода-вывода NI USB-6008:

- устройство сбора данных NI USB-6008 присоединяется к компьютеру посредством интерфейса USB 2.0;
- содержит восемь каналов ввода аналоговых сигналов (AI), два канала генерации аналоговых сигналов (AO), 12 каналов цифрового ввода/вывода (DIO) и 32-разрядный счетчик;
- максимальная частота дискретизации 10 кГц;



- разрешение при аналоговом вводе 12 бит (дифференциальное подключение), или 11 бит (подключение с общим проводом);
- размеры 75×65×22 мм.

Оцифрованный аналоговый сигнал через устройство ввода-вывода поступает на компьютер, где производится его дальнейшая обработка цифровыми методами.

### **Компьютерная обработка и управление работой спектрометра**

Компьютер выполняет следующие функции (см. рис. 2):

- управление работой аналоговых и высокочастотных узлов спектрометра;
- получение данных от аналоговой части, их обработка и визуализация;
- сохранение полученных результатов в заданном формате;
- обработка полученных данных встроенными средствами и программами.

Обработку данных можно осуществлять:

- на лету, т.е. производить встроенным в общую оболочку специализированным программным обеспечением, сразу же выдавая на экран требуемый результат (искомый физический параметр) – такой режим удобен для рутинных измерений и для производства;
- постфактум, т.е. вначале результаты записи спектра сохраняют в виде файла и/или в специализированной базе данных, затем можно производить по этим данным расчеты в любой доступной программе для математических расчетов (если форматы данных совместимы).

Возможны также три режима обработки встроенным программным обеспечением:

- полностью автоматизированный (режим «лаборант»), с минимальной возможностью настройки параметров;
- режим «эксперт», позволяющий свободно управлять параметрами обработки данных;
- режим «разработчик», дает полный доступ ко всем функциям прибора.

Управление спектрометром и цифровую обработку аналогового сигнала производят в среде LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench*) – это среда разработки и платформа для выполнения программ, созданных на графическом языке программирования G фирмы National Instruments (США) [3].

LabVIEW используют в системах сбора и обработки данных, а также для управления техническими объектами и технологическими процессами. Идеологически LabVIEW в большей степени ориентирована на решение задач

не столько в области АСУ ТП, сколько в области АСНИ (автоматизированная система научных исследований).

Для увеличения отношения сигнал-шум, и тем самым повышения реальной чувствительности, в спектрометре применена цифровая фильтрация сигнала с помощью цифрового фильтра Баттерворта второго порядка (характеристики фильтра выбирают при настройке прибора) с программно-настраиваемой частотой среза (от 1 до 0,001 Гц).

Дополнительно к цифровой фильтрации применена линейная интерполяция, усредняющая значения нескольких последовательных точек. Доступны и другие типы интерполяции.

Количество точек, по которым производится интерполяция, настраиваемое и может быть изменено пользователем в зависимости от задачи.

Регистрация полученного сигнала ЯМР производится несколькими способами:

- построение графика сигнала ЯМР в функции развертки частоты;
- запись в файл \*.dat полученных цифровых значений;
- сохранение «картинки», полученной при записи линии. Сохранение производится в собственном «внутреннем» формате файлов LabView. При этом фиксируются все настройки, при которых проводился данный сеанс измерений;
- возможно также сохранение скриншота (снимка с экрана) стандартными средствами операционной системы. При этом по нажатию клавиши PrintScreen происходит сохранение вида экрана в буфере, после чего содержимое буфера можно вставить в любой графический редактор, затем сохранить изображение в удобном формате. При этом возможно редактирование картинки. Полученные изображения экрана можно впоследствии использовать в демонстрационных целях, вставлять их в публикации и презентации.

## **Испытания и их результаты**

При испытаниях макета были проведены следующие измерения.

**1. Запись спектра дробленого угля** для общей оценки работы прибора. Уголь в дробленном состоянии хранился в ампуле, влажность его составляла 0,7 %. На полученном спектре были хорошо видны широкая и узкая линии. Узкая линия обусловлена наличием свободной воды в образце. Отношение сигнал-шум для широкой линии не менее 4. Следовательно, у спектрометра есть еще большой запас чувствительности.

**2. Запись спектра воды** для оценки разрешающей способности спектрометра. Вода сама по себе имеет чрезвычайно узкую линию, поэтому, как правило, записанная ширина линии воды на самом деле обусловлена аппаратурной погрешностью. В первую очередь, вклад в увеличение ширины линии вносит неоднородность поля магнита. Были записаны линии ЯМР воды с

различными амплитудами ВЧ-сигнала и различными значениями модуляции. Минимальная измеренная ширина линии воды (около 0,01 Э) получена при модуляции 0,01 Э.

При дальнейшем уменьшении амплитуды модуляции до 0,001 Э сужения линии не наблюдалось. Это говорит о том, что достигнуто аппаратное ограничение, обусловленное неоднородностью поля магнита в объеме образца порядка 0,01 Э на 1 см.

3. **Запись сигнала ЯМР «пустого» контура** проведена для оценки чувствительности спектрометра ЯМР, ограниченной фоновым сигналом. На самом деле контур не пустой. В него была помещена стандартная пробирка для образцов, заполненная фторопластовой пленкой, которую применяют для уплотнения дробленого угля. Фторопластовая пленка была специально взята в гораздо большем количестве, чем при обычных экспериментах, чтобы выявить вносимый ею вклад. Для получения максимально возможного сигнала уровень ВЧ и модуляции выбраны завышенными до предельно применимых значений (100 мВ и 5 Э соответственно).

4. Одновременно оценивали **вклад посторонних источников сигнала**, распложенных вне пробирки. Записи фонового сигнала показали, что вносимый посторонними включениями вклад лишь незначительно превышает аппаратный уровень шумов, и значительно меньше даже по сравнению с весьма слабым сигналом от дробленого угля с малой влажностью. В то же время их вклад в полезный сигнал необходимо учитывать при проведении измерений на грани чувствительности прибора.

### **Выводы**

- Создан макет лабораторного портативного спектрометра ЯМР (ЛПС) для исследования углей, в котором для связи с компьютером применено промышленное серийно выпускаемое устройство ввода-вывода NI USB-6008.

- Для разработки программного обеспечения использована среда LabVIEW, широко применяемая при разработке прикладного программного обеспечения и позволяющая гибко и оперативно дорабатывать его функциональность и интерфейс. Большая часть функций прибора перенесена из аналогового блока в компьютер, что позволило повысить функциональность, стабильность работы и надежность прибора.

- Результаты испытаний макета ЛПС показали, что основные требования технического задания выполнены. Продолжаются работы с целью дальнейшего улучшения его эксплуатационных характеристик и совершенствования прибора.

## Список литературы / References

1. Радиофизика в угольной промышленности / А.Д. Алексеев, В.Е. Зайденварг, В.В. Синолицкий и др. – М.: Недра, 1992. – 184 стр.  
Alekseyev, A.D., Zaidenvarg, V.Ye., Sinolitskiy, V.V. etc. (1992). *Radiophysika v ugol'noy promyshlennosti* [Radiophysics in coal industry]. Moscow: Nedra Publ., Russia, 184 p.
2. Алексеев А.Д. Физика угля и горных процессов. – Киев: Наук. думка, 2010. – 424 с.  
Alekseyev, A.D. (2010). *Phizika uglya i gornyykh protsessov* [Physics of coal and mining processes]. Kiev: Naukova dumka Publ., Ukraine, 424 p.
3. Тревис Дж. LabVIEW для всех. – М.: ДМК Пресс; ПриборКомплект, 2005. – 544 с.  
Trevi J. (2005). *LabVIEW dlya vseh* [LabVIEW for all]. Moscow: DMK Press Publ., Russia, PriborKomplekt, 544 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Г.П. Стариковым.  
Дата поступления рукописи 16.03.2016

*Igor Grigoryevich Kostenko*, research worker; e-mail: [cactus47@mail.ru](mailto:cactus47@mail.ru);  
*Yevgeniy Pavlovich Sapunov*, research worker; e-mail: [evgeniy.sapunov@mail.ru](mailto:evgeniy.sapunov@mail.ru);  
*Yuriy Aleksandrovich Sluzhbin*, head of department; e-mail: [sluzba@gmail.com](mailto:sluzba@gmail.com);  
*Tat'yana Vasil'yevna Borchsh*, acting research worker; e-mail: [tatyanadnr@mail.ru](mailto:tatyanadnr@mail.ru);  
Government institution "Institute of Physics of Mining Processes"  
283114, Donetsk, 72, Rosa Luxemburg st. Phone (+38 062) 311-52-85

## THE NMR LABORATORY PORTABLE SPECTROMETER

**Purpose.** Creation of the model of the portable nuclear magnetic resonance (NMR) spectrometer.

**Methods.** Use of the NMR spectra of the coal substance to investigate the phase state of water and methane in strata.

**Results.** The prototyping sample of the NMR laboratory portable spectrometer was created, and its tests were carried out.

**Novelty.** The small dimensions and mass of the device allow spreading the application of the NMR methods in the laboratories.

**Practical value.** The development permits to spread the use of the NMR methods by the study of the coal substance and to make them more available for the research laboratories.

**Keywords:** *NMR spectrometer; properties of the coal substance; phase state of water and methane in the coal substance.*

## 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, 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. Рекомендуются, 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.

**Статьи, которые не соответствуют указанным требованиям, не будут рассмотрены.**

# Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал  
2016, № 2 (53)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик О.А. Шестакова

Верстальщик Т.Н. Филатова

Основатель 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 22.04.2016.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38062) 311-69-52; 311-31-47

Объем 3,4 Мб

E-mail: [niigd@mail.ru](mailto:niigd@mail.ru)

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата публикации выпуска 28 апреля 2016 г.

**АСПИРАНТУРА**  
**НИИГД «Респиратор»**

---

**Контакты:**

тел. +38(062)311-69-52

факс (062)311-69-43

e-mail: [niigd@mail.ru](mailto:niigd@mail.ru)

**ПЕРЕЧЕНЬ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ**  
**ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩЕЙ**  
**АСПИРАНТУРЫ**

---

**Технические науки**

05.26.01 – охрана труда

21.26.02 – безопасность в чрезвычайных  
ситуациях

05.26.03 – пожарная и промышленная  
безопасность