



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 1 (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. – № 1 (53). – 132 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 № 1 от 04.02.2016).

Редакционная коллегия:

канд. техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	П.С. Пашковский – заместитель главного редактора
д-р техн. наук	А.Н. Баратов
д-р техн. наук	Ю.Ф. Булгаков
д-р техн. наук	С.С. Гребенкин
д-р техн. наук	С.П. Греков
д-р техн. наук	С.Г. Ехилевский
д-р техн. наук	В.Г. Игишев
д-р техн. наук	В.В. Ковалишин
д-р техн. наук	В.К. Костенко
д-р техн. наук	В.В. Мамаев
канд. техн. наук	И.Ф. Марийчук
д-р техн. наук	Д.Ю. Палеев
д-р техн. наук	В.М. Плотников
д-р техн. наук	С.Б. Романченко
д-р техн. наук	Я. Цыганкевич
канд. техн. наук	Ю.Н. Ющенко

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. 1 (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. 1(53). – 132 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. 1 from 04.02.2016).

Editorial board:

Cand. Sci. (Tech.) V.G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.) P.S. Pashkovskiy – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.) A.N. Baratov
Dr. Sci. (Tech.) Yu.F. Bulgakov
Dr. Sci. (Tech.) S.S. Grebyenkin
Dr. Sci. (Tech.) S.P. Grekov
Dr. Sci. (Tech.) S.G. Yekhilevskiy
Dr. Sci. (Tech.) B.G. Igishev
Dr. Sci. (Tech.) V.V. Kovalishin
Dr. Sci. (Tech.) V.K. Kostenko
Dr. Sci. (Tech.) V.V. Mamayev
Cand. Sci. (Tech.) I.Ph. Mariychuk
Dr. Sci. (Tech.) D.Yu. Paleyev
Dr. Sci. (Tech.) V.M. Plotnikov
Dr. Sci. (Tech.) S.B. Romanchenko
Dr. Sci. (Tech.) Ya. Cygankiewicz
Cand. Sci. (Tech.) Yu.N. Yushchenko

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>I. Пожарная и промышленная безопасность</i>	
Кострубицкий А.А., Агеев В.Г. Динамика импульсных струй жидкости при дистанционном тушении пожара	7
Богомаз А.М., Зинченко И.Н. Закономерности заполнения помещения дымом при пожарах	16
Греков С.П., Старикова И.Г., Орликова В.П. Минимальное безопасное скопление органического материала	23
Коляда А.Ю., Дикенштейн И.Ф., Диденко А.А. Оптимизация параметров комбинированного противопожарного разрыва в шахтах	31
Козлитин А.А., Лебедева В.В., Непочатых И.Н., Лукомская Т.М. Выбор сорбента для экспрессного определения газохроматографическим методом инициаторов горения в пробах с места пожара	40
Инкарбаев Б.Д. Процесс горения углеводородов при аварии с железнодорожными цистернами	50
<i>II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях</i>	
Пашковский П.С. Особенности процесса пенообразования в генераторах с принудительной подачей воздуха	58
Стефаненко П.В., Артемова А.Ю. Роль человеческого фактора в обеспечении безопасности работы АЭС	65
Гребенкин С.С., Буряк Д.С., Розанова Е.Н. Влияние породных отвалов закрывающихся шахт на состояние объектов окружающей среды	74
Зинченко И.Н., Пашковский О.П. Фильтрация воздуха через угольно-породные скопления на отвалах	82

TABLE OF CONTENTS

<i>I. Fire and industrial safety</i>	
Kostrubitskiy A.A., Ageyev V.G. Movement of pulse liquid jets by the remote fighting of a fire	7
Bogomaz A.M., Zinchenko I.N. Dependences of filling a room with smoke by fires	16
Grekov S.P., Starikova I.G., Orlikova V.P. The minimum safe accumulation of an organic material	23
Kolyada A.Yu., Dikenshteyn I.F., Didenko A.A. Optimization of parameters of the combined fire break in the mines	31
Kozlitin A.A., Lebedeva V.V., Nepochatykh I.N., Lukomskaya T.M. Choice of a sorbent for the express determination of combustion initiators in the samples taken from a site of the fire using the gaschromatographic method	40
Inkarbayev B.D. The process of combustion of hydrocarbons by an accident with rail tank cars	50
<i>II. Safety in emergencies</i>	
Pashkovskiy P.S. Peculiarities of the process of foam-formation in the supplied-air generators	58
Stefanenko P.V., Artyemova A.Yu. The role of the human factor in security of the safety of the atomic power station operation	65
Grebyenkin S.S., Buryak D.S., Rozanova Ye.N. Influence of the waste dumps of the mines being closed down on the state of environmental objects	74
Zinchenko I.N., Pashkovskiy O.P. Air filtration through coal-and-rock accumulations on dumps	82

Слабченко А.Н., Инкарбаев Б.Д. Система связи и оповещения как средство защиты населения в чрезвычайных ситуациях

89

Slabchenko A.N., Inkarbayev B.D. The communication and warning system as a protection mean of the population in emergencies

Карцев М.В. Режимы работы аммиачных холодильных установок при угрозе возникновения чрезвычайных ситуаций

95

Kartsev M.V. Operation modes of the ammoniac refrigerating plants by the hazard of origin of emergencies

III. Охрана труда

Плетенецкий Р.С. Влияние кондиционирования на параметры вдыхаемого воздуха в аппаратах с химически связанным кислородом

102

Pletenetskiy R.S. Influence of the conditioning on the inhaled air parameters in the breathing apparatus, chemical oxygen type

Завьялов Г.В. Выбор материалов для противотепловой спецодежды

109

Zav'yalov G.V. Choice of materials for the special high-temperature protective clothing

Пефтибай Г.И., Чапкович А.В., Богатырев Ю.В., Выпирайло Н.А. Основные параметры устройства для разрезания строительной арматуры

120

Peftibay G.I., Chapkovich A.V., Bogatyryev Yu.V., Vypiraylo N.A. Principal parameters of the device for cutting-off the building reinforcement

Требования к оформлению статьи

130

Requirements of execution of an article

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 614.841.45:614.842.612 "Импульсные"

Алексей Александрович Кострубицкий, министр; Министерство по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий ДНР; e-mail: mchs-dnr@mail.ru; 283050, Донецк, ул. Щорса, 60. Тел. (+38062) 340-62-28;

Владимир Григорьевич Агеев, канд. техн. наук, директор; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; e-mail: niigd@mail.ru; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-39-89

ДИНАМИКА ИМПУЛЬСНЫХ СТРУЙ ЖИДКОСТИ ПРИ ДИСТАНЦИОННОМ ТУШЕНИИ ПОЖАРА

Цель. Моделирование динамики импульсных струй перед очагом пожара в зависимости от вязкости жидкости.

Методы. Теоретическое исследование с использованием уравнения движения газожидкостных систем, применён численный метод решения дифференциальных уравнений нестационарного относительного движения одиночной импульсной струи перед очагом пожара.

Результаты. Предложена математическая модель на основе классических уравнений движения с учётом деформации головной части струи. Получены аналитические зависимости падения скорости струи при её деформации. Установлено, что чем меньше вязкость жидкости, тем больше деформируется струя и больше падает её скорость.

Научная новизна. На основе классических уравнений движения газожидкостных систем предложена математическая модель, учитывающая деформации импульсных струй перед очагом пожара.

Практическая значимость. Результаты исследований дают возможность изучить при заданной вязкости жидкости степень деформации головной части струи, радиус разлёта капель жидкости и падение её скорости, что позволяет определить дальность полёта импульсной струи.

Ключевые слова: пожар; тушение; импульсная струя; скорость истечения; аналитическая зависимость; деформация; падение скорости.

Постановка проблемы. Пожары в зданиях и сооружениях до сих пор приводят к гибели десятков тысяч людей, они приносят огромный материальный ущерб, исчисляемый десятками миллиардов долларов в год. Обеспечение пожарной безопасности – основная задача, которую необходимо выполнять при постройке и эксплуатации современных жилых и производственных зданий, торгово-развлекательных и масштабных деловых центров.

Среди задач, связанных с разработкой и совершенствованием способов и средств противопожарной защиты объектов хозяйства, а также с повышением эффективности работы по ликвидации аварий, вопросы борьбы с пожарами занимают одно из основных мест.

Особенно сложно вести борьбу с пожарами в замкнутых помещениях, имеющих ограниченные возможности для подачи средств пожаротушения, типа подвальных и полуподвальных помещений, шахт, тоннелей и др. Большое практическое значение имеет борьба с пожарами на начальной стадии их развития.

Актуальность этого вопроса в настоящее время становится все значительнее в связи с расширением использования материалов и изделий на основе

полимеров. Отсутствие эффективных средств борьбы с пожарами в ряде случаев является причиной перехода его в развитую стадию.

Внедрение новых средств пожаротушения вызывает необходимость разработки и совершенствования методов расчёта параметров средств пожаротушения и эффективности ликвидации аварий.

При тушении пожаров водой необходимо выполнять следующие требования: дальнобойность струи, малый расход воды, максимально возможная площадь покрытия очага горения, большая скорость поглощения теплоты и высокий охлаждающий и флегматизирующий эффект. Решить вопрос повышения эффективности системы водяного пожаротушения можно только в результате исследований динамики сплошных и импульсных турбулентных струй, исследований теплового взаимодействия с очагом пожара жидкой дискретной фазы после распада струй и разработки на этой основе высокоэнергетической установки водяного пожаротушения.

Тушение пожаров сплошными или компактными струями из-за малой дальности действия их активной части не позволяет воздействовать на очаг пожара на большом расстоянии. В то же время способ тушения пожаров импульсными высокоэнергетическими струями даёт возможность значительно увеличить их дальнобойность и уменьшить расход воды. При этом способе тушения пожаров из сопла водомёта периодически выбрасывается определённая масса воды. За счёт большой скорости околосвукового истечения в виде жидкостного стержня достигается эффект дальнобойности.

Цель исследования – моделирование движения и деформации импульсных струй перед очагом пожара в зависимости от вязкости жидкости.

Изложение основного материала. Для установления динамики и деформации импульсных струй будем исходить из теории движения газожидкостных систем. На рис.1, на основании общих представлений и известных экспериментальных данных [1, 2], приведена схема движения, деформации и распада импульсной струи, которую можно изобразить вначале в виде сильно вытянутого стержня, головная часть которого постепенно деформируется, а сама струя колеблется, в результате чего распадается.

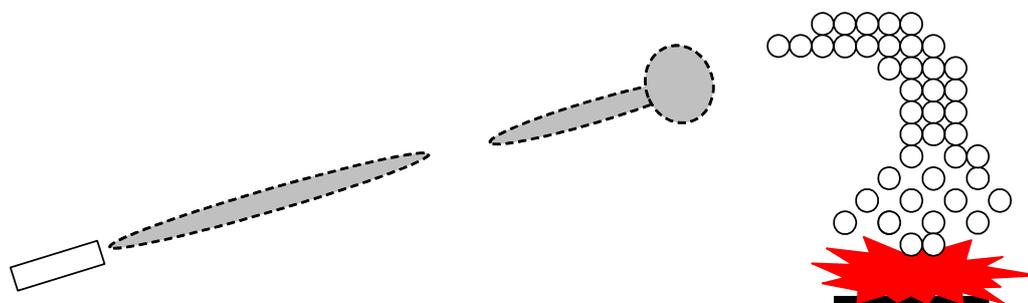


Рис. 1. Схема динамики импульсной струи, её деформации и распада

Будем считать, что до распада импульсной 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 импульсной струи в единице её объёма можно представить в виде

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

где ρ_1, ρ_2 – плотность жидкости и окружающего воздуха соответственно, кг/м³;

w – скорость движения струи, м/с;

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

λ – коэффициент бокового трения струи о воздух;

ζ – коэффициент лобового аэродинамического сопротивления;

S_6 – площадь боковой поверхности струи, м²;

S – площадь поперечного сечения струи в головной её части, м²;

V – объём жидкости в импульсной струе, м³.

При больших числах Рейнольдса возникающая разность давлений на лобовой и кормовой частях струи стремится её деформировать и сплюснуть. В этом случае площадь поперечного сечения головной части струи с течением времени будет увеличиваться, в результате чего возникают незатухающие колебания струи, приводящие к её распаду на мелкие капли жидкости (см. рис. 1). Взаимодействие жидкой и газовой фаз на границе их раздела можно описать уравнением

$$2\mu_1 \left(\frac{dv}{dR} \right) = \zeta \rho_2 \frac{w^2}{2} - \sigma (1/R_1 + 1/R_2), \quad (2)$$

где μ_1 – коэффициент турбулентной динамической вязкости воды на границе с вентиляционным потоком, кг/(м·с);

R – текущий радиус струи, м;

v – поперечные пульсации скорости, м/с;

σ – коэффициент поверхностного натяжения жидкости, Па·м;

R_1, R_2 – главные радиусы кривизны головной части струи, м.

Из уравнения (2) следует, что изменения поперечной составляющей скорости струи вдоль радиуса и, таким образом, поперечных её размеров, происходят в результате аэродинамического сопротивления движению, которое тем больше, чем больше кинетическая энергия струи. Этому динамическому воздействию на струю противостоит сила поверхностного натяжения жидкости.

При их равновесии, что может иметь место после распада струи, поперечные размеры образовавшихся капель жидкости уже не будут меняться.

Полагая производную поперечной скорости по радиусу приближённо равной их отношению

$$\left(\frac{dv}{dR} \right)_{\text{гр}} = v_{\text{гр}} / R$$

и добавляя очевидное равенство на границах жидкой и газовой фаз

$$\frac{dR}{dt} = v_{\text{гр}},$$

вместо уравнения (2) получим

$$2\mu_1 \frac{dR}{dt} = R \left[\zeta \rho_2 \frac{w^2}{2} - \sigma (1/R_1 + 1/R_2) \right]. \quad (3)$$

Определим главные радиусы кривизны импульсной струи, которую представим в виде сильно вытянутого эллипсоида. Для эллипсоида главные радиусы кривизны в направлении движения струи и поперёк движению определяются соответственно по формулам

$$R_1 = 2R^2 / l; \quad R_2 = l^2 / 4R, \quad (4)$$

где l – длина струи, м.

Так как объём струи равен $V = \pi R^2 l$, откуда длина струи $l = V / (\pi R^2)$, то, подставляя это выражение в формулы (4), получим

$$R_1 = 2\pi R^4 / V; \quad R_2 = V^2 / 4\pi^2 R^5. \quad (5)$$

В этом случае, поскольку площадь поперечного сечения $S = \pi R^2$, вместо уравнения (3) будем иметь

$$\mu_1 \frac{dS}{dt} = S \left[\zeta \rho_2 \frac{w^2}{2} - \sigma \left(\frac{\pi V}{2S^2} + \frac{4S^{2,5}}{\pi^{0,5} V^2} \right) \right]. \quad (6)$$

Анализ полученного уравнения (6) показывает, что изменение площади поперечного сечения головной части струи будет тем больше, чем меньше турбулентная вязкость жидкости. При большой вязкости стержень струи при полёте почти не изменит своей формы, что соответствует физическим представлениям. В то же время при малой вязкости жидкости, которую представляет вода, форма струи будет значительно меняться и каждой скорости в установившемся режиме будет соответствовать своя форма струи.

Уравнения (1) и (6) образуют систему для отыскания скорости изменения полёта импульсной струи и площади поперечного сечения её головной части при начальных условиях

$$w(0) = w_0; \quad S(0) = S_0, \quad (7)$$

где w_0 – начальная скорость истечения струи, м/с;

S_0 – начальная площадь поперечного сечения струи, м².

Для получения аналитического решения задачи будем считать все параметры, входящие в уравнения (1) и (6), заранее известными, за исключением искомым функций скорости w и площади сечения струи S . Предположим, что до распада струи её длина меняется незначительно, а радиус кривизны фронтальной части струи намного меньше радиуса кривизны боковой части ($R_1 \gg R_2$). Тогда уравнение (6) можно упростить и представить в виде

$$\mu_1 \frac{dS}{dt} = S \left[\zeta \rho_2 \frac{w^2}{2} - \sigma \frac{\pi l}{2S} \right]. \quad (8)$$

Этому уравнению (8) эквивалентно уравнение

$$\frac{dS}{dt} = A(t)S - B,$$

коэффициенты которого равны

$$A(t) = \zeta \rho_2 \frac{w^2}{2\mu_1}; \quad B = \frac{\pi \sigma l}{2\mu_1}. \quad (9)$$

Общее решение уравнения (9) со вторым граничным условием (7) представим в виде

$$S = \exp\left(\int A(t)dt\right) \left[S_0 - B \int_0^t \exp\left(-\int A(\tau)d\tau\right) d\tau \right].$$

В первом приближении, полагая

$$A(0) = A_0 = \zeta \rho_2 \frac{w_0^2}{2\mu_1}, \quad (10)$$

вместо решения (10) получим

$$S(t) = \exp(A_0 t) \left[S_0 - \frac{B}{A_0} (1 - \exp(-A_0 t)) \right]. \quad (11)$$

Решение уравнения (1) с первым граничным условием (7) в результате интегрирования можно представить в виде

$$w^{-1} = w_0^{-1} + \frac{C}{w_0 - w_1} \left(\frac{\lambda}{\zeta} S_\delta t + \int_0^t S(\tau) d\tau \right),$$

откуда найдем функцию скорости струи

$$w = \frac{w_0}{1 + C \left(\frac{\lambda}{\zeta} S_\delta t + \int_0^t S(\tau) d\tau \right)}, \quad (12)$$

где коэффициент C равен

$$C = \frac{\zeta \rho_2}{2\rho_1 V} w_0. \quad (13)$$

Подставляя в общее решение (12) функцию (11), будем иметь

$$w = \frac{w_0}{1 + \frac{C}{A_0} \left[\left(S_0 - B/A_0 \right) \left(\exp(A_0 t) - 1 \right) + \left(B/A_0 + \frac{\lambda}{\zeta} S_\delta \right) A_0 t \right]}. \quad (14)$$

Анализ полученных решений (11) и (14) показывает, что площадь поперечного сечения головной части импульсной струи будет увеличиваться, а скорость её движения уменьшаться по сравнению с начальными значениями.

Из формул (11) и (14) следует, что можно образовать безразмерные критериальные комплексы для моделирования динамики струи. Так, согласно (9), (11), (13) и (14) получим три безразмерных комплекса

$$K_1 = \frac{B}{AS_0} = \frac{\pi\sigma l}{2\mu_1 S_0}; \quad K_2 = \frac{CS_0}{A_0} = \frac{\mu_1 S_0}{V\rho_1 w_0}; \quad K_3 = \frac{\lambda S_0}{\zeta S_0}. \quad (15)$$

Здесь первый критерий характеризует отношение сил поверхностного натяжения жидкости к силам её вязкости. Второй критерий подобия представляет собой отношение сил вязкости жидкости к количеству её движения. Третий критерий характеризует отношение сил бокового аэродинамического сопротивления движению струи к лобовому сопротивлению.

С помощью критериев подобия можно значительно упростить вид уравнений (11) и (14) и придать им следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}(\bar{t}) &= K_1 + (1 - K_1) \exp(\bar{t}); \\ \bar{w}(\bar{t}) &= \frac{1}{1 + K_2 \left\{ (1 - K_1) [\exp(\bar{t}) - 1] + (K_1 + K_3) \bar{t} \right\}}, \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

где $\bar{S} = S / S_0$ – относительная площадь сечения головной части струи;

$\bar{w} = w / w_0$ – относительная скорость;

$\bar{t} = A_0 t$ – безразмерное время.

На рис. 2 по данным расчёта по первой формуле (16) для произвольно выбранного значения $K_1 = 0,9$ определена форма головной части струи, меняющаяся во время полёта струи, где относительный радиус струи $\bar{R} = \sqrt{\bar{S}}$.

В начале полёта струя почти не деформируется, а затем головная её часть может существенно расширяться (см. рис. 2).

На рис. 3 по данным расчёта по второй формуле (16) представлены результаты моделирования характера изменения скорости движения струи для произвольно выбранных критериев $K_1 = 0,9$ и $K_1 = 1$, т.е. с учётом расширения струи и без него. При этом второй и третий критерии подобия приняты равными $K_2 = 1$ и $K_3 = 0$.

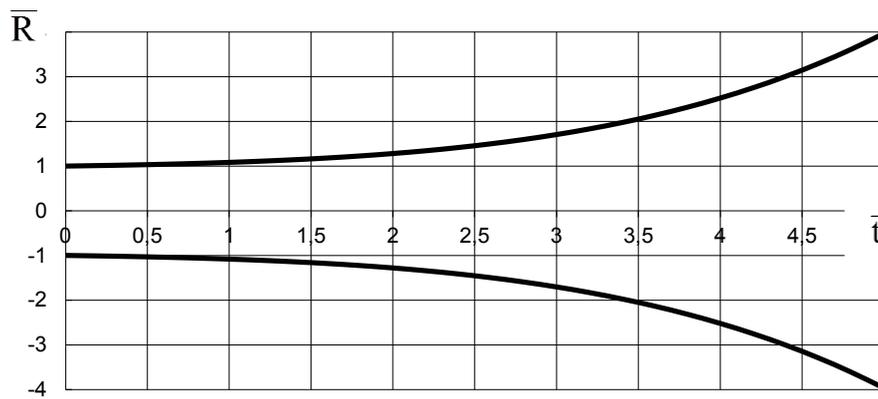


Рис. 2. Изменение формы головной части импульсной струи

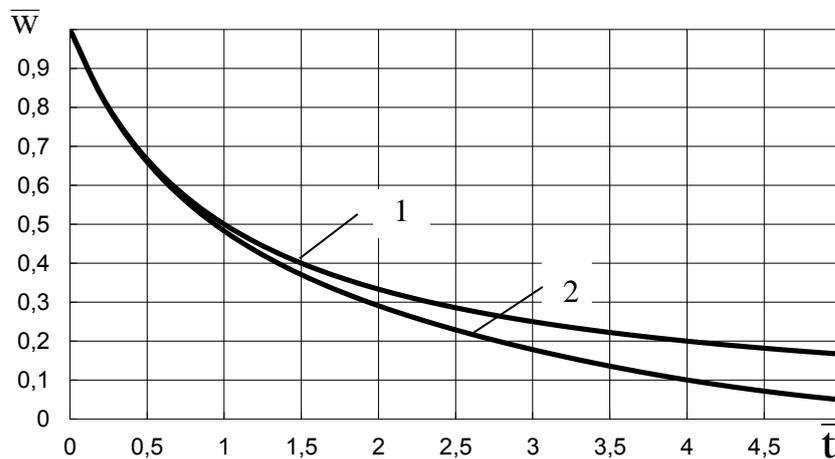


Рис. 3. Падение скорости движения импульсной струи без изменения её формы (1) и с изменением формы (2)

Существенным может быть влияние деформации струи на падение её скорости, что играет большую роль при определении дальности полёта струи (см. рис. 3).

Вывод. Полученные результаты аналитических исследований динамики импульсных струй перед очагом пожара позволяют определить при заданной вязкости жидкости не только степень деформации головной части струи и тем самым радиус разлёта капель жидкости, но и падение её скорости, а также дальность полёта импульсной струи.

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, 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, pp. 62 – 69.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 25.12.2015

Aleksey Aleksandrovich Kostrubitskiy, Minister; the Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defense Affairs, Emergencies, and Liquidation of Consequences of Natural Disasters e-mail: mchs-dnr@mail.ru; 283050, Donetsk, 60, Shchors st. Phone (+38062) 340-62-28;

Vladimir Grigoryevich Ageyev, Cand. Sci. (Tech.), director; the "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR; e-mail: niigd@mail.ru; 283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38062) 311-39-89

MOVEMENT OF PULSE LIQUID JETS BY THE REMOTE FIGHTING OF A FIRE

Purpose. Simulation of movement of the pulse jets in front of the seat of fire depending on viscosity of the fluid.

Methods. Theoretical investigation with the use of the equation of motion of gas-liquid systems, the numerical technique for the solving of differential equations of the non-stationary relative motion of the single pulse jet in front of the fire is applied.

Results. The mathematical model based on the classical equations of motion subject to the deformation of the head part of the jet is offered. The analytical dependences of the speed drop of the jet by its deformation are received. It is established that the lower is the viscosity of the fluid, the greater deforms the jet and the more decreases its speed.

Scientific novelty. On the basis of the classic equations of motion of gas-liquid systems the mathematical model subject to deformations of the pulse jets in front of the seat of fire is proposed.

Practical value. The results of the investigations enable to study deformation degree of the head part of the jet by the liquid viscosity specified, emission radius of the liquid drops and decrease of its speed, what allows determining the flight range of the pulse jet.

Keywords: *fire; fighting; pulse jet; velocity of flow; analytical dependence; deformation; speed decrease.*

УДК 614.841.45:544.772.42

Андрей Михайлович Богомаз, аспирант; e-mail: mchs-dnr@mail.ru; Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, ведущий инж.; e-mail: zinstar@mail.ru; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-69-52; 311-13-52

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ ПОМЕЩЕНИЯ ДЫМОМ ПРИ ПОЖАРАХ

Цель. Теоретические исследования и получение аналитических зависимостей скорости и времени заполнения горящего помещения дымом.

Методы. Рассмотрены процессы заполнения дымом помещения при пожаре под действием тепловой депрессии.

Результаты. Предложены аналитические зависимости тепловой депрессии в поле гравитации, скорости и расхода смеси газов, поступающих к очагу пожара. Получена аналитическая зависимость времени заполнения дымом горящего помещения, удовлетворительно согласующаяся с экспериментальными данными.

Вывод. Проведенные исследования позволили получить аналитические зависимости скорости потока газов над очагом пожара и дымообразования.

Ключевые слова: *пожар; газы; тепловая депрессия; дымообразование; помещение.*

Постановка проблемы. Борьба с пожарами требует фундаментального научного и экспериментального подхода, который можно было бы использовать и на этапе проектирования объектов, и при их эксплуатации. В этом случае важно изучение динамики пожаров в помещениях и образование дыма, его движения и проникновения в коридоры и на лестничные пролеты.

Моделирование тепломассообмена в помещениях и коридорах широко распространено для определения ожидаемых температуры, концентраций дыма и токсичных газов на стадиях проектирования зданий и их эксплуатации.

Однако, несмотря на постоянное совершенствование алгоритмов и программ расчёта параметров пожара различными методами (интегральным, зонным или полевым) [1 – 5], они, по сути, не затрагивают моделирования процессов возникновения и движения газов под действием тепловой депрессии, и заполнения помещения дымом, что создаёт угрозу их проникновения в коридоры и на лестничные пролеты, где могут находиться люди.

Цель статьи. Проведение теоретических исследований и получение аналитических зависимостей скорости и времени заполнения горящего помещения дымом.

Основная часть. Возникновение пламенного горения в помещении начинается от зажигания, представляющего собой такой процесс, при котором происходит быстрая экзотермическая реакция, вызывая изменения в горючем материале, приводящие к резкому повышению в нём температуры по сравнению с температурой окружающей среды. Различают два характерных вида возникновения процесса горения: 1) вынужденное зажигание с помощью некоторого источника, такого, как электрическая искра или постороннее пламя;

2) самовоспламенение, при котором изнутри происходит нагревание твёрдого вещества в результате химических реакций. Большинство пожаров связано с горением твёрдых материалов, хотя во многих случаях горят и жидкие, и газообразные вещества. Многообразие горючих веществ очень велико и включает в себя простейшие газообразные углеводороды и твёрдые вещества с большой относительной массой и сложной химической структурой. Все эти вещества, перейдя в газообразное состояние и реагируя с кислородом в воздухе, образуют продукты горения и выделяют теплоту в процессе окисления.

При пожаре в закрытом помещении (рис. 1) раскалённые пожарные газы, поднимаясь к потолку, начинают опускаться к полу по всей площади поверхности потолка, вытесняя чистый воздух, который поступает при этом в зону горения. Такое движение дыма может продолжаться, пока он не достигнет пола, в результате чего чистый воздух будет израсходован и к очагу пожара станет поступать смесь газов, почти лишённая кислорода.

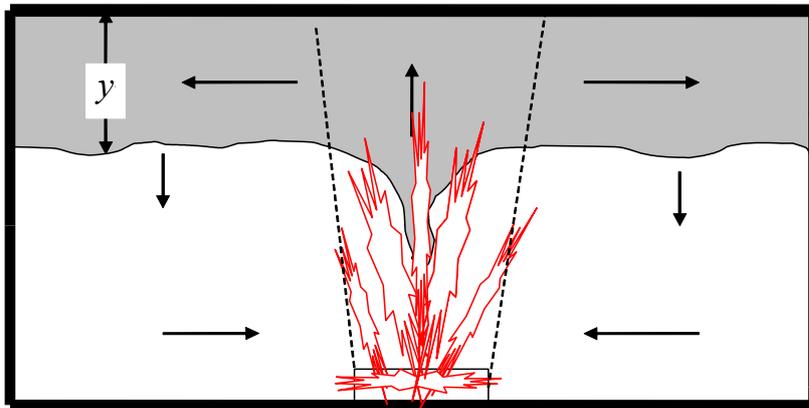


Рис. 1. Схема дымообразования при пожаре в закрытом помещении

Движущей силой при пожаре в закрытом помещении является только тепловая депрессия за счёт разности весов газов в очаге пожара и вне его. Так, тепловую депрессию, действующую в очаге пожара, определим, рассматривая рис. 1. При отсутствии принудительной вентиляции помещения горение в его объёме будет продолжаться за счёт свободной конвекции воздуха, вызванной вертикально действующей тепловой депрессией. В этом случае пожарные газы устремляются к потолку помещения и затем по всей площади потолка вниз. Чистый же воздух понизу, у пола, поступает к очагу пожара, как показано на рис. 1.

Определим тепловую депрессию, действующую в помещении по направлению от пола до потолка, по формуле [6]

$$h_T = g(\rho_0 - \rho)(H - y), \quad (1)$$

где h_T – тепловая депрессия в зоне горения, Па;

g – ускорение свободного падения (принимают обычно равным $9,81 \text{ м/с}^2$);

ρ_0 – плотность воздуха при нормальной температуре, кг/м³;

H – высота помещения, м;

y – расстояние от потолка до границы слоя дыма (см. рис. 1).

Уравнение состояния смеси газов [7] имеет вид

$$P = \rho RT, \quad (2)$$

где P – давление, Па;

R – газовая постоянная, Па·м³/(кг·К);

T – температура, К.

При дозвуковых потоках газов давление меняется незначительно, на несколько десятков или сотен паскалей. По отношению к атмосферному давлению ($P_0 = 10^5$ Па) эти колебания ничтожно малы.

Поэтому можно принять [6] $P \approx P_0$. В этом случае, так как $R = P_0/(\rho_0 T_0)$, то уравнение состояния газов (2) можно представить в виде

$$\rho/\rho_0 = T_0/T, \quad (3)$$

где ρ_0 – плотность воздуха до пожара, кг/м³;

T_0 – температура воздуха до пожара, К.

Это говорит о том, что во сколько раз повышается температура, во столько же раз понижается плотность газа и во столько же раз повышается скорость смеси газов в очаге пожара.

Используя отношение (3), придадим формуле (1) вид

$$h_T = \rho_0 g (1 - T_0/T) (H - y). \quad (4)$$

Под действием тепловой депрессии поток газовой смеси преодолевает два расстояния от очага пожара до слоя дыма, а слой дыма, всё утолщаясь, движется к полу. Это позволяет определить общий расход воздуха, поступающего к очагу пожара. Массовый расход смеси газов над очагом пожара представим в виде

$$Q = \rho u_1 S_1 / \rho_0, \quad (5)$$

где u_1 – скорость воздуха над очагом пожара, м/с;

S_1 – площадь поперечного сечения потока раскалённых газов, м².

Используя известную в гидравлике формулу [6], представим её в виде

$$h_T = \left[\left(\frac{\lambda_1 H}{S_1^{0,5}} + \xi_1 \right) / S_1^2 + \left(\frac{\lambda_2 y}{S_2^{0,5}} + \xi_2 \right) / S_2^2 \right] \frac{T}{T_0} \rho_0 Q^2, \quad (6)$$

где λ_1 – коэффициент аэродинамического сопротивления по длине факела;
 λ_2 – коэффициент аэродинамического сопротивления по толщине слоя дыма;
 ξ_1 – коэффициент местного сопротивления в факеле;
 ξ_2 – коэффициент местного сопротивления движению дыма;
 S_1 – площадь зоны горения, м;
 S_2 – площадь пола или потолка за исключением площади зоны горения, м²;
 $Q = \tilde{u}_1 S_1$ – массовый расход воздуха через очаг пожара, м³/с.

Разрешая формулу (6) относительно расхода воздуха, поступающего к очагу пожара и уходящего из него, с учётом (4) найдём

$$Q = \sqrt{\frac{g(1 - T_0/T)(H - y)}{\left[(\lambda_1 H / S^{0,5} + \xi_1) / S_1^2 + (\lambda_2 y / S_2^{0,5} + \xi_2) / S_2^2 \right] T / T_0}}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что чем толще слой дыма, тем меньше чистого воздуха поступает к очагу пожара. При полностью занятом дымом помещении поступление чистого воздуха к очагу пожара прекратится.

Скорость $\tilde{u} = \rho u_2 / \rho_0$ движения дыма от потолка к полу можно определить, используя выражение (7), по формуле

$$\tilde{u}_2 = \sqrt{\frac{g(1 - T_0/T)(H - y)}{\left[(\lambda_1 H / S_1^{0,5} + \xi_1) S_2^2 / S_1^2 + (\lambda_2 y / S_2^{0,5} + \xi_2) \right] T / T_0}}. \quad (8)$$

Формулу (8) можно упростить, если площадь зоны горения намного меньше площади пола. Тогда формула (8) принимает вид

$$\tilde{u}_2 = \frac{S_1}{S_2} \sqrt{\frac{g(1 - T_0/T)(1 - y/H)}{\left[(\lambda_1 / S_1^{0,5} + \xi_1 / H) \right] T / T_0}}. \quad (9)$$

Основные потери давления будут при поворотах потока воздуха. Так, коэффициент местных сопротивлений $\xi = 1$ при повороте потока на 90°, а при четырёх поворотах встречных потоков можно принять $\xi = 4$. Принимая при шероховатых стенах $\lambda_1 = \lambda_2 = 0,1$ [6], найдём кривые изменения скорости движения дыма к полу, представленные на рис. 2 для разной высоты помещения.

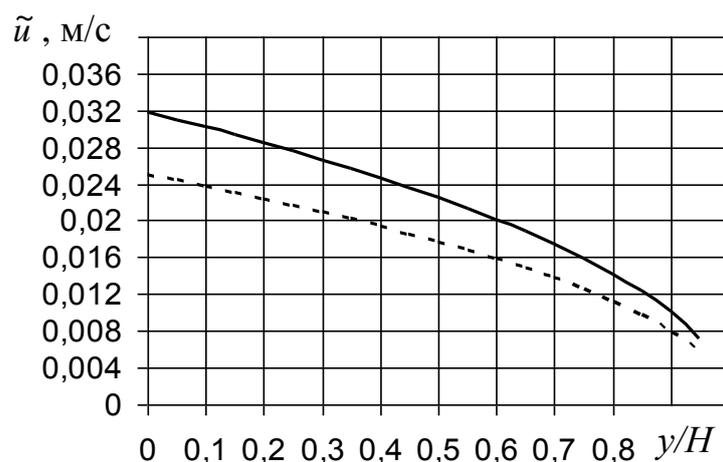


Рис. 2. Зависимость массовой скорости движения дыма к полу при разной высоте помещения (3 м – штриховая линия, 5 м – сплошная линия)

При расчётах площадь сечения зоны горения принималась согласно работе [7] равной $S_1 = 2 \text{ м}^2$, а площадь пола $S_2 = 100 \text{ м}^2$.

Так как скорость – производная от длины по времени, то формулу (9) можно представить в виде

$$\frac{dy}{d\tau} = \frac{S_1}{S_2} \sqrt{\frac{g(1-T_0/T)(1-y/H)}{[(\lambda_1/S_1^{0,5} + \xi_1/H)]T/T_0}}. \quad (10)$$

Интегрирование уравнение (10) позволяет получить формулу для определения времени заполнения помещения дымом:

$$\tau = \frac{2\sqrt{H}}{A} (1 - \sqrt{1 - y/H}), \quad (11)$$

где $A = \frac{S_1}{S_2} \sqrt{\frac{g(1-T_0/T)}{[(\lambda_1/S_1^{0,5} + \xi_1/H)]T/T_0}}$ – коэффициент пропорциональности.

В работе [7] приведены результаты исследований толщины слоя раскалённого дыма от температуры, от параметров помещения, площади зоны горения и др. С помощью экспериментальных моделей и ряда расчётных формул получены номограммы, предназначенные для проектировщиков. Как указывается, эти номограммы справедливы, если выполнены требования о достаточном количестве люков и расходе воздуха, обеспечивающем помещение свежим воздухом по мере удаления из него дыма.

На рис. 3 приведены данные об изменении толщины слоя чистого воздуха со временем в закрытом помещении при периметре 6 м (или площади зоны горения $S_1 = 2 \text{ м}^2$), площади пола $S_2 = 100 \text{ м}^2$ и высоте $H = 5 \text{ м}$. Такая ситуация принята для модели небольшой больничной палаты при охваченной пламенем койке, без учёта начального периода нарастания пожара.

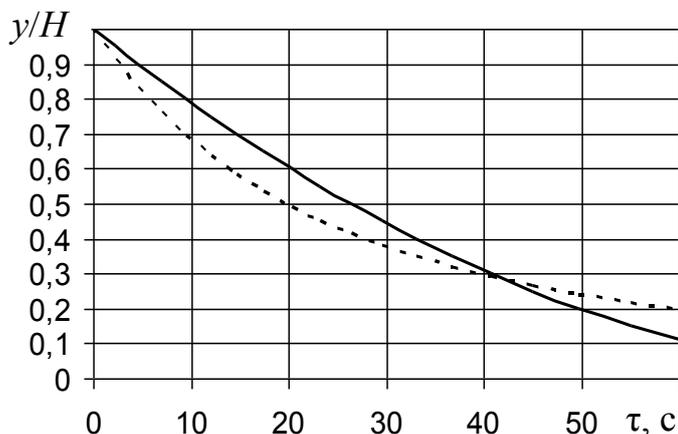


Рис. 3. Изменение толщины слоя чистого воздуха при высоте помещения 5 м, площади горячей поверхности 2 м^2 и площади пола 100 м^2 ; сплошная линия – по формуле (11), штриховая линия – по данным работы [7]

Расчёты по формуле (11) выполнены для гладких стен при $\lambda = 0,02$ и коэффициенте местного сопротивления движению потоков $\xi = 0,3$. Как видно, сходимость результатов расчёта по формуле (11) и по номограмме [7] (штриховая линия) удовлетворительная. Однако вызывает сомнение, что помещение объёмом 400 м^3 заполнится дымом за одну минуту, да ещё при горении одной койки.

Поэтому более близкими могут считаться результаты, полученные по формуле (11) для шероховатых стен при $\lambda = 0,1$ и местном сопротивлении встречных потоков $\xi = 4$. В этом случае получим, что дым опустится до пола на 4 м за $\tau = 190 \text{ с}$ (3,2 мин), что более вероятно.

Вывод. Проведенные теоретические исследования позволили получить аналитические зависимости расхода, скорости потока газов над очагом пожара и дыма, опускающегося от потолка к полу. Это позволило определять время заполнения горящего помещения дымом для оценки времени эвакуации людей.

Список литературы / References

1. Анализ поведения дымовых потоков в закрытых пространствах. Chew M. Y. L., Wong N. H., Ho J. C. L. (2000-2001). *Smoke control in confined space. J. Appl. Fire Sci.*, vol.10, no. 2, pp. 109 – 125.
2. Зонное моделирование движения дыма в коридорах здания. Jones W. W., Matsushita T., Baum H. R. (1995). *Smoke movements in*

corridors: adding the horizontal momentum equation to a zone model. NIST Spec. Publ., no. 838-7, p. 49.

3. Расчетное определение времени образования дымового слоя; эффект вентиляции.

Morgan H.P., Compton P. (2001). *Smoke-filling calculations – the importance of «plugholing»*. *Fire Safety Eng.*, vol. 8, no. 6, pp. 13 – 16.

4. Моделирование процесса задымления атриума.

Jiang An, Liu Fang, Fu Xiang-zhao (2002). *Xiaofang kexue yu jishu = Fire Sci. and Technol.*, vol. 21, no. 4, pp. 7 – 9.

5. Пузач С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.

Puzach, S.V. (2005). *Metody raschyeta teplomassoobmena pri pozhare v pomeshchenii i ikh primeneniye pri reshenii prakticheskikh zadach pozharovzryvobezopasnosti* [Methods of calculation of the heat-mass exchange by the fire in a room and their use by solution of practical problems of fire-explosion safety]. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii, 336 p.

6. Лойцынский Л.Г. Механика жидкостей и газов. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

Loytsyanskiy, L.G. (2003). *Mekhanika zhidkostey i gazov* [Mechanics of fluids and gases]. Moscow: Drofa Publ., 840 p.

7. Драйздейл Д. Введение в динамику пожаров. – М.: Стройиздат, 1990. – 424 с.

Drayzdeyl, D. (1990). *Vvedeniye v dinamiku pozharov* [Introduction in dynamics of fires]. Moscow: Stroyizdat Publ., 424 p.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Г. Стариковой.
Дата поступления рукописи 25.01.2016

Andrey Mikhaylovich Bogomaz, postgraduate student; e-mail: mchs-dnr@mail.ru; *Igor Nikolayevich Zinchenko*, Cand. Sci. (Tech.), leading engineer; e-mail: 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 (+38062) 311-69-52

DEPENDENCES OF FILLING THE ROOM WITH SMOKE BY FIRES

Purpose. Theoretical investigations and receipt of analytical dependences of the velocity and time of filling the room being on fire with smoke.

Methods. The processes of filling of the room with smoke by the fire under the influence of the thermal depression are considered.

Results. The analytical dependences of the thermal depression in the gravitation field, velocity and discharge of the gas mixture coming to a seat of fire are proposed. The analytical dependence of the time of filling of the room being on fire with smoke that is satisfactorily concordant with the experimental data was received.

Conclusion. The investigations carried out allowed receiving the analytical dependences of gas flow velocity over the seat of fire and smoke formation.

Keywords: *fire; gases; thermal depression; smoke formation; room.*

УДК 614.841.41:536.244

Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: obep.niigd@list.ru; Ирина Геннадиевна Старикова, канд. техн. наук, ученый секр.; e-mail: ir-starik@yandex.ru; Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: orlikova.69@yandex.ua; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-13-52

МИНИМАЛЬНОЕ БЕЗОПАСНОЕ СКОПЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Цель. Установление минимальной толщины скопления материала на основании экспериментально полученных значений коэффициента теплоотдачи и ранее проведенных исследований по изучению кинетики окисления.

Методика. Основана на математической модели самонагрева материалов за счет химических реакций окисления и экспериментальных данных НИИГД «Респиратор».

Результаты. Найдено математическое решение для определения минимальной толщины скопления материала, подверженного самовозгоранию. Для расчета использованы результаты экспериментального определения коэффициента теплоотдачи различных органических материалов. Определены значения минимальной толщины скопления этих материалов с учетом теплообмена между материалом и окружающей средой. Проведен сравнительный анализ значений, полученных по предлагаемому и известному методам.

Научная новизна. Аналитические зависимости, полученные при исследовании угля, позволяют изучать процесс теплового самовозгорания различных материалов с учетом данных о теплофизических свойствах этих материалов и их кинетических параметрах окисления.

Практическая значимость. Полученные зависимости позволяют предотвратить самовозгорание материала путем определения его допустимой минимальной толщины скопления.

Ключевые слова: *толщина скопления; самовозгорание; инкубационный период; коэффициент теплоотдачи.*

Состояние вопроса. При выявлении критических параметров самовозгорания материала в процессе его самонагрева важнейшее значение имеют условия протекания экзотермической реакции. Их определяют не только свойства самого материала, но и его геометрические параметры, а также физические условия на границе объема с окружающей средой. Например, изменение объема материала или его геометрической формы повлечет нарушение условий массо- и теплопереноса внутри материала и вне его и приведет к изменению температурных условий самовозгорания.

В результате экзотермических реакций в объеме твердого материала происходит генерация теплоты, часть которой расходуется на разогревание самого материала, а другая часть отводится в окружающую среду. В разных точках объема условия генерации и отвода теплоты неодинаковы, поэтому возникает температурное поле. Теплоотвод от зон с более высокой температурой к зонам с меньшей температурой происходит за счет теплопроводности газа, заполняющего поры материала, теплопроводности частиц, конвекции газа, содержащегося между частицами, и излучением от частиц. Таким образом, происходит сложный теплообмен, при котором скорость тепловыделения зависит от кинетических параметров протекания

реакции, а скорость теплоотвода – от размера поверхности теплообмена и разности температур материала и окружающей среды.

Как правило, самовозгорание возникает в некоторой «горячей точке» внутри скопления, когда отношение внешней поверхности материала (площади теплоотдачи) к объему небольшое, а площадь поверхности реагирования много больше внешней поверхности материала. В противном случае за счет большого теплоотвода саморазогревание и самовозгорание будут невозможны.

Цель настоящей работы – установление минимальной толщины скопления материала на основании экспериментально полученных значений коэффициента теплоотдачи и ранее проведенных исследований по изучению кинетики окисления.

Материалы и результаты исследований. В работе [1] на основании теоретических исследований [2] предложена математическая модель самонагрева материалов за счет химических реакций окисления в виде

$$T = T_0 \left\{ 1 + \Gamma_T \sum_{k=1}^{\infty} B_k \frac{1 - \exp[-(\mu_k^2 - \Gamma_T) Fo]}{\mu_k^2 - \Gamma_T} \right\}, \quad (1)$$

где T и T_0 – текущая и начальная температуры органического материала, К;
 Γ_T – комплексный критерий генерации теплоты, определяемый зависимостью

$$\Gamma_T = \frac{\xi C_{O_2} q k m^2}{\rho c_V T_0 a}; \quad (2)$$

ξ – доля реакционной поверхности;
 C_{O_2} – концентрация кислорода в материале, моль/м³;
 q – теплота реакции окисления, Дж/моль;
 k – константа скорости окисления, с⁻¹;
 ρ – плотность материала, кг/м³;
 c_V – теплоемкость материала при постоянном объеме, Дж/(кг·К);
 m – толщина скопления материала, м;
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 μ_k – корни уравнения [4];

$$\operatorname{tg} \mu = - \frac{\mu}{Bi - 1};$$

B_k – коэффициенты, определяемые из уравнения [3];

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

Bi – критерий теплообмена Био, равный

$$Bi = \frac{\alpha m}{\lambda}; \quad (3)$$

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 Fo – критерий Фурье, определяемый по формуле

$$Fo = \frac{at}{m^2}; \quad (4)$$

t – время, с.

Из анализа выражений (1) – (4) следует, что существенное влияние на изменение температуры оказывают, кроме времени, физико-химические и кинетические параметры материала, а также значение критерия Био. Физико-химические параметры материала зависят от природных характеристик – коэффициента внутренней диффузии, пористости, степени измельчения. Влияние химической активности органического материала, в частности угля, на процесс его самонагрева подробно изучено ранее [4]. Поэтому рассмотрим влияние критерия Био.

Как показали исследования [3], с достаточной для практических целей точностью можно ограничиться одним членом суммы в выражении (1) и одним корнем μ_k^2 . Значения Bi как правило меньше 1, что позволяет принять $\mu^2 = Bi$.

Для случая $Bi = 0$ выражение (1) примет вид

$$\ln \frac{T}{T_0} = \Gamma_T Fo. \quad (5)$$

Подставляя в (5) выражения (2) и (4), получим

$$\ln \frac{T}{T_0} = \frac{\xi C_{O_2} q k}{\rho c_V T_0} t, \quad (6)$$

откуда

$$t = \ln \frac{T}{T_0} \frac{\rho c_V T_0}{\xi C_{O_2} q k}. \quad (7)$$

Из анализа уравнения (6) следует, что изменение температуры во времени не зависит от размеров скопления самоокисляющегося материала.

Для случая наличия теплообмена между материалом и окружающей средой сделаем некоторые математические преобразования в выражении (1), полагая $\mu^2 = 3Bi$:

$$\begin{aligned} \frac{T}{T_0} &= 1 + \frac{1 - \exp\left[-\left(\frac{\mu^2}{\Gamma_T} - \Gamma_T\right)Fo\right]}{\frac{\mu^2}{\Gamma_T} - 1} = 1 + \frac{1 - \exp\left[-\frac{3Bi}{\Gamma_T} \Gamma_T Fo\right] \exp[\Gamma_T Fo]}{\frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1} = \\ &= 1 + \frac{1 - \exp[(\Gamma_T Fo)^{-b}]}{b}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $b = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1$.

Из выражения (8) следует, что динамика температуры скопления материала, подверженного самонагреванию, зависит от двух безразмерных параметров: $\Gamma_T Fo = \ln(T_{кр}/T_0)$, характеризующего температуру материала при $Bi = 0$, и b , определяющего приток Γ_T и отвод Bi теплоты. Здесь $T_{кр}$ – критическая температура самовозгорания материала.

Используя выражения (2) и (4) для $\Gamma_T Fo$ и решая (8) относительно t , получим

$$t|_{Bi \neq 0} = -\frac{\ln\left[-\left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 - \frac{1}{b}\right)b\right]}{b} \frac{\rho c_V T_0}{\xi C_{O_2} q k}. \quad (9)$$

Если обозначить первый множитель как \bar{t} , то выражение (9) запишем в виде

$$t|_{Bi \neq 0} = -\bar{t} \frac{\rho c_V T_0}{\xi C_{O_2} q k}. \quad (10)$$

Сравнивая выражения (9) и (7), нетрудно заметить, что при $b = 1$ ($Bi = 0$) выражение (9) переходит в (7). Таким образом, параметр b определяет инкубационный период t при наличии теплообмена скопления материала с окружающей средой.

При $Bi = \text{const}$ выражение (10) определяется значением \bar{t} . Зависимость $\bar{t} = f(T_{кр}/T_0, b)$ имеет четыре характерные точки:

- $\bar{t} = \ln \frac{T_{кр}}{T_0}$ при $b = -1$;
- $\bar{t} = \frac{T_{кр}}{T_0} - 1$ при $b = 0$;
- $\bar{t} = -\ln\left(2 - \frac{T_{кр}}{T_0}\right)$ при $b = 1$;
- $\bar{t} \rightarrow \infty$ при $b = \frac{1}{\frac{T_{кр}}{T_0} - 1}$, т. е. $\frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1 = \frac{1}{\frac{T_{кр}}{T_0} - 1}$.

Подставляя в уравнение (11) выражения для Γ_T и Bi , найдем выражение для толщины скопления материала m в виде

$$m = \frac{3 \frac{\alpha}{\lambda} a B}{\frac{1}{(T_{кр}/T_0)^{-1} + 1}} = \frac{T_{кр} - T_0}{T_{кр}} 3 \frac{\alpha}{\lambda} a B, \quad (12)$$

$$\text{где } B = \frac{\rho c_V T_0}{\xi C_{O_2} q k}. \quad (13)$$

Полученная зависимость позволяет по данным о теплофизических свойствах самовозгорающегося материала и кинетических параметрах найти минимальную толщину его скопления, способного к самовозгоранию.

Коэффициент теплоотдачи материала определяли по методике, разработанной в Институте физики горных процессов [5]. Для этого навеску материала массой 10 г, предварительно высушенную, нагревали до температуры 120 °С в течение 30 мин. Фиксировали падение температуры образца материала во времени до комнатной температуры с шагом 1 мин и, используя полученные данные, строили графическую зависимость, характеризующую кинетику охлаждения материала. Выражение для времени, в течение которого происходит охлаждение материала, τ_0 , с, имеет вид

$$\tau_0 = \frac{\tau_k - \tau_n}{\ln \frac{T_n - T_c}{T_k - T_c}}, \quad (14)$$

где τ_k – время достижения материалом комнатной температуры, с;

τ_n – начальное время, с;

T_n – начальная температура материала, соответствующая t_n , К;

T_c – температуры окружающей среды, К.

Коэффициент теплоотдачи α определяли из выражения

$$\alpha = \frac{\rho_n c_V V}{t_0 S}, \quad (15)$$

где ρ_n – насыпная плотность материала, кг/м³;

V – объем материала, м³;

S – площадь поверхности материала, м².

Для кусочка материала, имеющего кубическую форму, выражение (15) примет вид

$$\alpha = \frac{d \rho_n c_V}{6 t_0}, \quad (16)$$

где d – диаметр зерна (размер фракции), м.

Результаты определения коэффициента теплоотдачи для различных органических материалов с диаметром зерна (фракции) $d = 0,375$ мм и другие термические характеристики представлены в таблице.

Расчетная минимальная толщина скопления органических материалов

Характеристика материала	Уголь марки А	Мука ржаная	Мука из зерна овса	Крупа манная	Мука из крупы пшеничной
Плотность ρ , кг/м ³	1691	655	825	680	706
Продолжительность охлаждения материала τ_0 , с	688,05	997,76	934,98	757,32	726,88

Окончание таблицы

Характеристика материала	Уголь марки А	Мука ржаная	Мука из зерна овса	Крупа манная	Мука из крупы пшеничной
Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м ² ·К)	0,078	0,046	0,060	0,066	0,066
Коэффициент теплопроводности λ_m , Вт/(м·К)	0,300	0,164	0,104	0,104	0,135
Коэффициент температуропроводности $a \cdot 10^8$, м ² /с	17,79	22,40	9,25	6,90	9,25
Энергия активации E , Дж/моль	15007	88054	50740	50740	81200
Критическая температура самовозгорания материала $T_{кр}$, К	380	492	487	490	530
Константа скорости окисления $k \cdot 10^3$, с ⁻¹	2,0	0,82	2,41	2,6	4,23
Параметр $B \cdot 10^6$ по формуле (13)	5,78	17,32	8,91	6,46	3,95
Минимальная толщина скопления m , м	0,19	1,27	0,55	0,33	0,23

Используя зависимости (7) – (13) и данные о теплофизических свойствах различных органических материалов [6], найдем значения минимальной толщины скопления этих материалов m с учетом теплообмена между материалом и окружающей средой (см. таблицу). Долю реакционной поверхности угля ξ находим согласно зависимости, приведенной в работе [7]:

$$\xi = -7,24 \cdot 10^{-6}(V^{\Gamma})^2 + 2,99 \cdot 10^{-4}V^{\Gamma} + 3,76 \cdot 10^{-3}, \quad (17)$$

где V^{Γ} – массовая доля летучих веществ в угле, %.

Для других органических материалов ξ определяли исходя из найденной зависимости скорости тепловыделения от энергии активации с учетом плотности исследуемого материала [8]. В качестве теплового эффекта реакции q принимали величину, равную $1,12 \cdot 10^4$ Дж/моль, а константу скорости окисления k рассчитывали по уравнению Аррениуса.

Если принять за толщину скопления угля, подверженного самонагреванию, 0,17 м [9], а для других органических материалов 0,065 м [6], что соответствует перевозке и хранению в стандартных мешках по ГОСТ 2226-88, то, как следует из таблицы, можно исключить опасность самовозгорания рассмотренных материалов. При других условиях и размерах пожароопасность веществ может быть рассчитана по приведенным выше зависимостям.

Выводы. Для различных материалов органического происхождения получены экспериментальные значения коэффициента теплоотдачи. На основании исследований реакционной активности углей разработан алгоритм определения минимального безопасного скопления различных органических материалов.

Список литературы / References

1. Лазаров Л., Ангелова Г. Структура и реакции углей // София: Изд-во Болгарской АН, 1990. – 232 с.

Lazarov, L., Angelova, G. (1990). *Struktura i reaktsii ugley* [Structure and reactions of coals]. Sofia: Izd-vo Bolgarskoy AN, Publ. 232 p.

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

Berezovskiy, N.A. (1998). *Matematicheskiye modeli protsessov diffuzii, soprovozhdayemoy adsorbtsiyey i chimicheskimi reaktsiyami* [The mathematical models of diffusion processes accompanied with adsorption and chemical reactions]. *Nelineynyye krayevyye zadachi matematicheskoy fiziki i ikh prilozheniya: sb. nauch. tr.* “Nonlinear boundary problems of the mathematical physics and their applications”. [Proc. of the Institute of Mathematics of the National Academy of Sciences of the Ukraine]. Kiev, pp. 29 – 31.

3. Греков С.П., Зинченко И.Н., Тында Г.Б. Сорбционные процессы в угольных скоплениях при метановыделении и испарении влаги // Вестн. Херсонского нац. техн. ун-та. – Херсон: ХНТУ, 2006. – Вып. 2 (25). – С. 166 – 173.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B. (2006). *Sorbtsionnyye protsessy v ugolnykh skopleniyakh pri metanovydelenii i isparenii vlagi* [Sorption processes in coal accumulations by methane release and water evaporation]. *Sb. Khersonskogo nats. techn. univ.* [Proc. of the Kherson nat. techn. univ.]. Kherson: KhNTU, issue 2 (25), pp. 166 – 173.

4. Греков С.П., Калюсский А.Е., Баклан В.В. Неизотермическая кинетика хемосорбции газов микропористыми сорбентами // ЖФХ. – 1996. – Т. 70, № 8. – С. 1496 – 1498.

Grekov, S.P., Kalyusskiy, A.Ye., Baklan, V.V. (1996). *Neizotermicheskaya kinetika khemosorbtsii gazov mikroporistymi sorbentami* [Nonisothermic kinetics of chemisorption of gases with microporous sorbing agents]. *ENFKh*, vol. 70, no. 8, pp. 1496 – 1498.

5. Старикова И.Г. Определение коэффициентов теплоотдачи от угля в окружающие среды // Мат. XXIII Междунар. науч. школы им. академика С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Симферополь: Таврич. нац. ун-т, 2013. – С. 258 – 261.

Starikova, I.G. (2013). *Opredeleniye koeffitsiyentov teplootdachi ot uglya v okruzhayushchiye sredy* [Determination of heat-transfer coefficients from coal into environments]. The 23rd Academician S.A. Khristianovich International Scientific School “Deformation and destruction of materials with defects and dynamical effects in strata and mine workings”. Simferopol: *Tavrisheskiy nat. univ.*, pp. 360 – 364.

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

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

7. Греков С.П., Всякий А.А., Орликова В.П. Особенности низкотемпературного окисления углей и их пожароопасность // Уголь Украины. – 2015. – № 7-8. – С. 51 – 54.

Grekov, S.P., Vsyakiy, A.A., Orlikova V.P. (2015). *Osobennosti nizkotemperaturnogo okisleniya ugley i ikh pozharoопасnost* [Distinctive features of the low-temperature oxidation of coals and their fire hazard]. *Ugol Ukrainy*, no. 7-8, pp. 51 – 54.

8. Греков С.П., Пашковский П.С., Орликова В.П. Реакционная активность органических материалов и их пожароопасность // Науковий вісник УкрНДІПБ: наук. журн. – 2015. – № 2(32). – С. 26 – 31.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S. and Orlikova V.P. (2015). *Reaktsionnaya aktivnost organicheskikh materialov i ikh pozharoопасnost* [Reaction activity of organic materials and their fire hazard]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB. Naukovyi zhurnal*. Kiev, no. 2 (32), pp. 26 – 31.

9. 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., 792 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 10.12.2015

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: obep.niigd@list.ru ; Irina Gennadiyevna Starikova, Cand. Sci. (Tech.), academic secretary; e-mail: ir-starik@yandex.ru; Victoria Petrovna Orlikova, scientific associate; e-mail: orlikova.69@yandex.ua; the “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR; 283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38062) 311-13-52

THE MINIMUM SAFE ACCUMULATION OF AN ORGANIC MATERIAL

Purpose. Determination of the minimum thickness of the material accumulation on the basis of heat-transfer coefficient values received experimentally and investigations to study the oxidation kinetics carried-out before.

Methods. The methods are based on the mathematical model of the spontaneous heating of the materials at the expense of chemical oxidation reactions and experimental data of the NIIGD “Respirator”.

Results. The mathematical solution to determine the minimum thickness of the accumulation of the material liable to spontaneous combustion is found. The results of the experimental determination of the heat-transfer coefficient of various organic materials were used for the calculation. The values of the minimum thickness of the accumulation of these materials were determined subject to the heat transfer between the material and environment. The comparative analysis of the values received according to the proposed and known methods was carried out.

Scientific novelty. The analytical dependences received by investigation of coal permit to study the process of the thermal spontaneous combustion of various materials subject to data about thermophysical properties of these materials and their kinetic oxidation parameters.

Practical value. The dependences received permit to prevent the spontaneous combustion of the material by means of determination of its allowable minimum thickness of the accumulation.

Keywords: *thickness of the accumulation; spontaneous combustion; incubation period; heat-transfer coefficient.*

УДК 622.822.3+[622.822.7:614.842.612“Завесы”]

Андрей Юрьевич Коляда, нач. отд.; e-mail: kolyada@ukr.net; Игорь Феликсович Дикенштейн, науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru; Артем Алексеевич Диденко, науч. сотр.; e-mail: didenartem89@gmail.com; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-10-84; 311-39-70

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ КОМБИНИРОВАННОГО ПРОТИВОПОЖАРНОГО РАЗРЫВА В ШАХТАХ

Цель. Оптимизация параметров комбинированного противопожарного разрыва в горных выработках шахт.

Методика. Математический анализ результатов минимизации затрат на создание комбинированного противопожарного разрыва.

Результаты. Рассмотрены вопросы совместного действия противопожарного разрыва и водяной завесы при локализации пожаров в горных выработках угольных шахт. Использование водяной завесы совместно с противопожарным разрывом позволяет уменьшить длину противопожарного разрыва. Получена зависимость затрат на создание зоны локализации от параметров пожара, геометрических размеров противопожарного разрыва и гидравлических параметров водяной завесы. Путем минимизации затрат получены оптимальные параметры комбинированного противопожарного разрыва.

Практическая значимость. Определены оптимальные параметры устройства комбинированного противопожарного разрыва исходя из минимума затрат на его создание.

Ключевые слова: угольная шахта; горная выработка; пожар; локализация пожара; пожарный газ; охлаждение пожарных газов; противопожарный разрыв; водяная завеса; оптимизация.

Постановка проблемы. В проекте «Правил пожарной безопасности для предприятий угольной промышленности ДНР» предусмотрены меры по локализации подземных пожаров в горных выработках угольных шахт с использованием водяных завес и противопожарных разрывов. При разработке лав длинными столбами, например, предусматривается создание в выработках через каждые 400...500 м противопожарных разрывов («голодных зон»).

При локализации пожара только с помощью противопожарного разрыва его длина может достигать 300 м и более, что осуществить в реальных условиях угольной шахты в большинстве случаев затруднительно. Создание полномасштабных водяных завес также сопряжено с определенными трудностями в связи с необходимостью расходования больших объемов воды. Поэтому встает вопрос о согласовании параметров водяной завесы и противопожарного разрыва при их совместном применении.

Связь с важными практическими задачами. Локализация с использованием водяных завес предусматривает охлаждение пожарных газов, исходящих из зоны пожара, до температур, безопасных в пожарном отношении, т.е. ниже температуры воспламенения наиболее горючего вида пожарной нагрузки в данной выработке.

Однако отмечены случаи, когда в месте монтажа установки локализации и тушения пожара выработка имела у кровли вывалы породы и пустоты, через

которые при пожаре проходит поток нагретых газов, не подвергавшийся охлаждающему воздействию водяной завесы. Неохлаждённый поток нагретых газов может вызвать воспламенение горючих материалов за зоной действия водяной завесы по ходу вентиляционной струи.

Особенно осложняется противопожарная защита горных выработок, примыкающих к пластам, склонным к самовозгоранию, или к местам с геологическими нарушениями, где увеличивается склонность углей к самовозгоранию.

В этой связи представляет интерес локализация и тушение пожаров в горных выработках с помощью комбинации двух средств: противопожарного разрыва в сочетании с установкой локализации и тушения пожара.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] определены технические требования к горным выработкам в зоне создания противопожарных разрывов. Представлен метод расчета параметров противопожарных разрывов.

В работе [2] рассмотрены вопросы совместного воздействия противопожарного разрыва и водяной завесы, показано, что их совместное использование позволяет либо уменьшить длину разрыва, либо снизить расход воды в завесе. Однако методика определения оптимальных параметров комбинированного противопожарного разрыва отсутствует.

Выделение не решенных ранее частей проблемы и цель статьи. Особенностью организации противопожарных зон является то, что по различным техническим или технологическим причинам обустроить полномасштабный противопожарный разрыв в большинстве случаев невозможно. Поэтому возникает задача организации комбинированной противопожарной защиты горных выработок системой, состоящей из установки локализации и тушения пожара и противопожарного разрыва. На участке разрыва выработка не должна иметь горючих материалов или изделий: древесины, конвейерных лент, вентиляционных резиновых труб, кабелей и др. При наличии кабеля он должен быть помещен в металлическую трубу. Должны быть устранены также возможные источники воспламенения горючих материалов. Следует отметить, что длина разрывов зависит от многих факторов: пожарной нагрузки примыкающей выработки, расхода подаваемого воздуха, площади поперечного сечения и периметра выработки, в которой создают противопожарный разрыв.

В связи с созданием комбинированных противопожарных разрывов возникает задача определения их оптимальных параметров с учетом площади поперечного сечения выработки, скорости вентиляционной струи, температуры потока пожарных газов.

Параметры противопожарного разрыва должны быть увязаны с параметрами установки локализации и тушения пожаров. Возникает задача исследования противопожарной защиты горных выработок угольных шахт установкой локализации и тушения пожара и противопожарным разрывом.

Изложение основного материала. Согласно [1] удельный массовый расход воды на создание водяной завесы определяют зависимостью

$$z_0 = \frac{c_{\Gamma}(t_{\Gamma\text{К}} - t_{\text{К}})}{c_{\text{Ж}}(t_{\text{ЖК}} - t_{\text{ЖО}}) + \chi \left[r + c_{\text{П}}(t_{\text{ПК}} - t_{\text{ПН}}) \right]}, \quad (1)$$

где z_0 – удельный расход воды, кг/с, необходимый для охлаждения 1 кг/с пожарных газов до требуемой температуры;

c_{Γ} – удельная теплоемкость газового потока, кДж/(кг·°С);

$t_{\Gamma\text{К}}$ – температура пожарных газов на входе в водяную завесу, °С;

$t_{\text{К}}$ – температура пожарных газов после их охлаждения пожарной завесой, °С;

$c_{\text{Ж}}$ – удельная теплоемкость жидкости, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{ЖК}}$ – температура воды при нагревании до кипения, °С;

$t_{\text{ЖО}}$ – температура воды на входе в водяную завесу, °С;

χ – доля воды, испарившейся в водяной завесе;

r – удельная теплота парообразования, кДж/кг;

$c_{\text{П}}$ – удельная теплоемкость водяного пара, кДж/(кг·°С);

$t_{\text{ПК}}$ – температура пара при его нагревании до температуры $t_{\text{ПК}}$, °С;

$t_{\text{ПН}}$ – температура пара при его образовании, °С; $t_{\text{ПН}} = 100$ °С.

При подстановке в зависимость (1) постоянных величин принимаем: $c_{\Gamma} = 1,00$ кДж/(кг·°С); $t_{\text{К}} \approx 250$ °С; $c_{\text{Ж}} = 4,19$ кДж/(кг·°С); $t_{\text{ЖК}} = 100$ °С; $t_{\text{ЖО}} = 20$ °С; $r = 2258,4$ кДж/кг; $c_{\text{П}} = 3,00$ кДж/(кг·°С); $t_{\text{ПК}} = t_{\Gamma\text{К}}$, $t_{\text{ПН}} = 100$ °С. Получаем

$$z_0 = \frac{(t_{\Gamma\text{К}} - t_{\text{К}})}{335,2 + \chi(1958 + 3t_{\Gamma\text{К}})}; \quad (2)$$

$$z_{\text{ОН}} = \frac{\rho_{\Gamma}(t_{\Gamma\text{К}} - t_{\text{К}})}{\rho_{\text{Ж}} \left(335,2 + \chi(1958 + 3t_{\Gamma\text{К}}) \right)} = \frac{4,43(t_{\Gamma\text{К}} - t_{\text{К}})}{335,2 + \chi(1958 + 3t_{\Gamma\text{К}})}, \quad (3)$$

где $z_{\text{ОН}}$ – удельный расход воды, м³/ч, на 1 м³/с пожарных газов;

$\rho_{\text{Ж}}$ – плотность воды; $\rho_{\text{Ж}} = 1000$ кг/м³;

ρ_{Γ} – плотность пожарных газов; $\rho_{\Gamma} = 1,23$ кг/м³.

Расход воды на образование водяной завесы установкой локализации и тушения:

$$G_{\text{уст.н}} = S v_{\text{В}} z_{\text{ОН}}, \quad (4)$$

где $G_{\text{уст.н}}$ – расчетный расход воды на установку, м³/ч;

S – площадь поперечного сечения выработки, м²;

$v_{\text{В}}$ – скорость движения пожарных газов вдоль выработки, м/с.

При заниженных расходах воды или значительных расходах газового потока $G_{го}$, кг/с, может не выполняться требуемое условие охлаждения пожарных газов

$$t_k < t_{восп}, \quad (5)$$

где $t_{восп}$ – температура воспламенения пожарной нагрузки за завесой, °С.

Дальнейшее охлаждение осуществляем, используя после водяной завесы противопожарный разрыв. Следует отметить, что в принципе водяная завеса в сочетании с противопожарным разрывом может быть расположена перед ним, после него или внутри разрыва, в зависимости от горно-технических условий.

$$L_p = -\frac{G_{го} c_{г}}{K_{\tau} P_B} \ln \frac{t_{восп} - t_{п}}{t_k - t_L}, \quad (6)$$

где L_p – расчетная длина противопожарного разрыва, м;

t_L – температура пожарных газов на расстоянии L , м, от начала противопожарного разрыва по ходу вентиляционной струи; $t_L < t_{восп}$;

$t_{п}$ – температура горных пород вокруг выработки до возникновения пожара, °С;

$G_{го}$ – массовый расход пожарных газов, проходящий вдоль противопожарного разрыва, кг/с;

P_B – периметр выработки, м;

K_{τ} – коэффициент нестационарного теплообмена пожарных газов со стенками противопожарного разрыва, Вт/(м²·°С);

$$K_{\tau} = 4,42 + 3,54v_B. \quad (7)$$

Так как

$$G_{го} = Sv_B \rho_{г}, \quad (8)$$

с учетом (7) выражение (6) примет вид

$$L_p = -\frac{Sv_B \rho_{г} c_{г}}{(4,42 + 3,54v_B) P_B} \ln \frac{t_{восп} - t_{п}}{t_k - t_{восп}}. \quad (9)$$

При $\rho_{г} = 1,23$ кг/м³; $c_{г} = 1,06 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $t_{восп} = 200$ °С; $t_{п} = 20$ °С получаем

$$L_p = -\frac{1237,38Sv_B}{(4,42 + 3,54v_B) P_B} \ln \frac{180}{t_k - 200}. \quad (10)$$

Вводим следующие показатели:

q_3 – удельные затраты, руб. на кубический метр в час воды;

q_p – удельные затраты, руб. на создание 1 м противопожарного разрыва (затраты на удаление из выработки горючих материалов и источников зажигания, перекрепление, при необходимости, нанесение антипирогенного покрытия на оставшиеся деревянные элементы крепи, размещение кабелей в металлических трубах или коробах и т.п.).

Тогда функция затрат на создание комбинированного противопожарного разрыва с водяными завесами:

$$Q = S v_{\text{в}} z_{\text{он}} q_3 + L_p q_p = \frac{4,43(t_{\text{ГК}} - t_{\text{к}}) S v_{\text{в}} q_3}{335,2 + \chi(1958 + 3t_{\text{ГК}})} - \frac{1237,38 S v_{\text{в}} q_p}{(4,42 + 3,54 v_{\text{в}}) P_{\text{в}}} \ln \frac{180}{t_{\text{к}} - 200}. \quad (11)$$

Оптимизация параметров такого разрыва может иметь место при $Q \rightarrow \min$, т.е. минимизации затрат на его создание.

Найдем первую производную функции затрат по температуре $t_{\text{к}}$:

$$\frac{dQ}{dt_{\text{к}}} = - \frac{4,43 S v_{\text{в}} q_3}{335,2 + \chi(1958 + 3t_{\text{ГК}})} + \frac{1237,38 S v_{\text{в}} q_p}{(4,42 + 3,54 v_{\text{в}})} \frac{1}{(t_{\text{к}} - 200)}; \quad (12)$$

$$\frac{dQ}{dt_{\text{к}}} = 0, \text{ откуда}$$

$$t_{\text{к}}^* = \frac{1237,38 q_p [335,2 + \chi(1958 + 3t_{\text{ГК}})]}{4,43(4,42 + 3,54 v_{\text{в}}) q_3} + 200. \quad (13)$$

Находим вторую производную

$$\frac{d^2 Q}{dt_{\text{к}}^2} = - \frac{1237,38 v_{\text{в}} S q_p}{(4,42 + 3,54 v_{\text{в}})(t_{\text{к}} - 200)} < 0. \quad (14)$$

Следовательно, в точке $t = t_{\text{к}}^*$ функция затрат имеет максимум. В этом случае минимизацию затрат можно провести, сравнивая их значение в отдельных точках интервала.

При использовании только водяной завесы

$$Q_{\text{I}} = \frac{4,43(t_{\text{ГК}} - 200) S v_{\text{в}} q_3}{335,2 + \chi(1958 + 3t_{\text{ГК}})}; \quad (15)$$

противопожарного разрыва

$$Q_{II} = -\frac{1237,38v_B S q_p}{(4,42 + 3,54v_B) P_B} \ln \frac{180}{t_K - 200}; \quad (16)$$

комбинированного разрыва затраты Q_{II} определяют по выражению (11), где температура t_K

$$t_K = t_{TK} - z_o \left[335,2 + \chi(1958 + 3t_{TK}) \right]. \quad (17)$$

Рассчитываем функцию затрат. Принимаем, что на создание водяной завесы используется установка локализации и тушения пожаров типа УЛТВ с номинальным расходом воды $Q_{уст.н} = 54 \text{ м}^3/\text{ч}$. Стоимость установки, включая амортизационные расходы на её содержание вплоть до списания, $Q_{з.у}$, руб., равна $Q_{з.у} = 80000 \text{ руб.}$, тогда $q_3 = \frac{80000}{54} = 1481,5 \text{ руб. на } 1 \text{ м}^3/\text{ч} \text{ воды}$.

В перечень работ на устройство противопожарного разрыва включается удаление горючих материалов, частичное перекрепление (при необходимости), антипирогенная обработка не удаляемых деревянных элементов крепи и деревянных шпал колеи, укрытие кабелей металлическими коробами. При использовании металлической рамной крепи КМП-АЗУ-27-16 с учетом тарифных ставок, взятых исходя из минимальной зарплаты по состоянию на 01.01.2016, удельные затраты на устройство 1 м противопожарного разрыва $q_p = 335 \text{ руб./м}$ [3].

Принимаем следующие параметры выработки $S = 12 \text{ м}^2$; $P_B = 11,432 \text{ м}$, скорость проветривания $v_B = 1,5 \text{ м/с}$. Средний диаметр капли в создаваемой водяной завесе $d_{к0} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, тогда доля испарившейся воды (при $t_{TK} = 800 \text{ °C}$) равна $\chi = 0,42$.

Принимаем температуру пожарных газов $t_{TK} = 1200, 1100, 1000, 900, 800, 700, 600 \text{ °C}$, количество форсунок на водяной завесе $n = 3, 4, 5, 6$ и рассчитываем затраты на создание комбинированного противопожарного разрыва и его параметры. Данные расчета представлены в табл. 1 и 2 и на рисунке.

Исходя из горно-технических условий и суммы затрат, сравнивая различные варианты, выбираем оптимальный. Например, чтобы локализовать пожар с температурой исходящих пожарных газов 800 °C и при возможности создания противопожарного разрыва длиной 100...130 м более дешевым будет создание водяной завесы с пятью оросителями (расход оросителя $0,001 \text{ м}^3/\text{с}$) и противопожарного разрыва длиной 96 м по сравнению с вариантом при четырех оросителях и длине разрыва 130 м. При этом экономится 10,7 % денежных средств.

Таблица 1

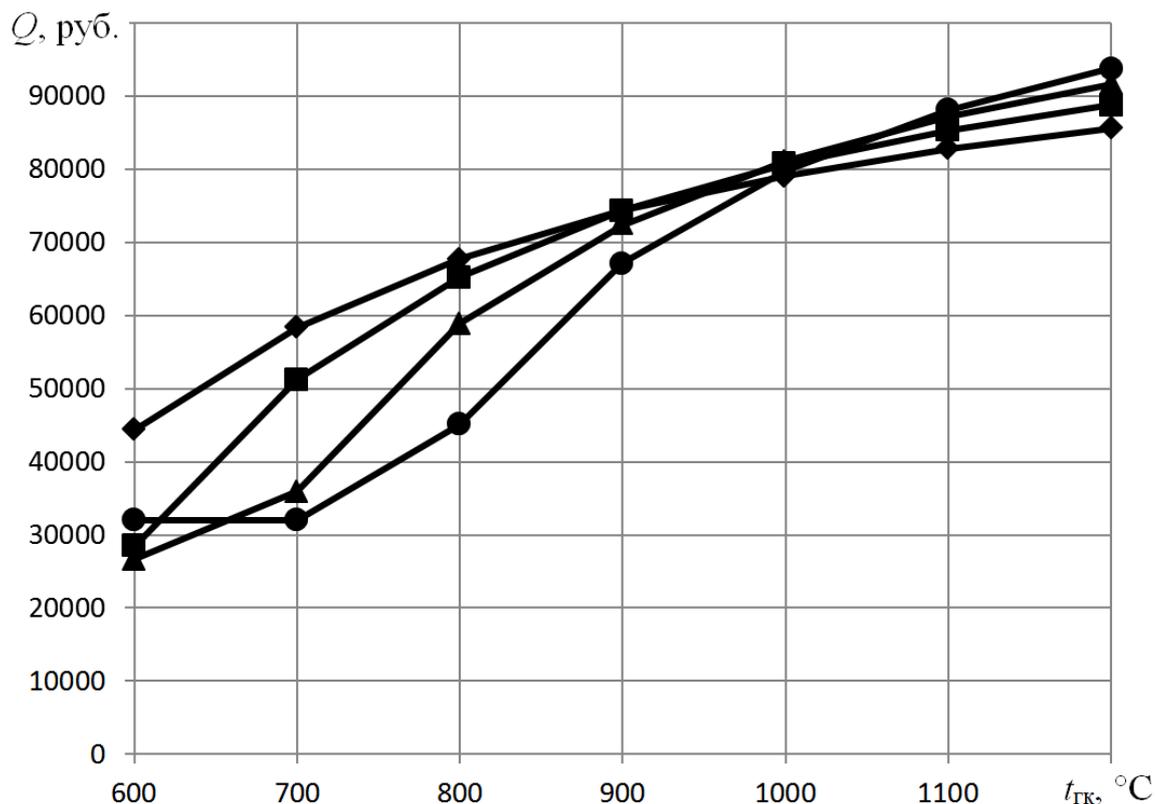
Параметры комбинированного разрыва

Температура на входе в зону горения $t_{гк}, ^\circ\text{C}$	Количество распылителей водяной завесы n							
	3		4		5		6	
	Температура на выходе водяной завесы $t_{к}, ^\circ\text{C}$	Длина противопожарного разрыва после водяной завесы $L_p, \text{м}$	Температура на выходе водяной завесы $t_{к}, ^\circ\text{C}$	Длина противопожарного разрыва после водяной завесы $L_p, \text{м}$	Температура на выходе водяной завесы $t_{к}, ^\circ\text{C}$	Длина противопожарного разрыва после водяной завесы $L_p, \text{м}$	Температура на выходе водяной завесы $t_{к}, ^\circ\text{C}$	Длина противопожарного разрыва после водяной завесы $L_p, \text{м}$
600	351,977	84,558	269,302	21,313	186,628	0	103,953	0
700	445,395	126,439	360,526	89,346	275,657	27,626	190,789	0
800	544,065	154,461	458,753	130,971	373,441	96,14	288,129	39,145
900	645,819	174,194	561,093	158,263	476,366	136,54	391,639	104,911
1000	749,362	188,466	665,816	177,237	582,27	162,67	498,724	143,019
1100	853,907	199,349	771,876	191,065	689,845	180,753	607,813	167,56
1200	958,973	207,844	878,631	201,535	798,288	193,923	717,946	184,559

Таблица 2

Затраты на создание комбинированного противопожарного разрыва

Температура на входе в зону горения $t_{гк}, ^\circ\text{C}$	Количество распылителей водяной завесы n											
	3			4			5			6		
	Затраты, руб.											
	завеса	разрыв	сумма	завеса	разрыв	сумма	завеса	разрыв	сумма	завеса	разрыв	сумма
600	16000,2	28326,93	44327,13	21333,6	7139,855	28473,46	26667	0	26667	32000,4	0	32000,4
700		42357,07	58357,27		29930,91	51264,51		9254,71	35921,71		0	32000,4
800		51744,44	67744,64		43875,29	65208,89		32206,9	58873,9		13113,58	45113,98
900		58354,99	74355,19		53018,11	74351,71		45740,9	72407,9		35145,19	67145,59
1000		63136,11	79136,31		59374,4	80708		54494,45	81161,45		47911,37	79911,77
1100		66781,92	82782,12		64006,78	85340,38		60552,26	87219,26		56133,61	88134,01
1200		69627,74	85627,94		67514,23	88847,83		64964,21	91631,21		61827,27	93827,67



Затраты на создание комбинированного противопожарного разрыва при

использовании в завесе:

- ◆ – трех распылителей;
- – четырех распылителей;
- ▲ – пяти распылителей;
- – шести распылителей

Выводы

1. Для успешной локализации подземных пожаров следует применять комбинированный противопожарный разрыв – сочетание противопожарного разрыва и водяной завесы.

2. Получено выражение для определения затрат на создание комбинированного противопожарного разрыва.

3. При составлении проектов противопожарной защиты шахт следует рекомендовать устройство комбинированного противопожарного разрыва исходя из минимума затрат на его создание.

Список литературы / References

1. Лапин К.И., Коляда А.Ю., Параметры противопожарных разрывов в горных выработках // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – 2012. – Вып. 49. – С. 111 – 118.

Lapin, K.I., Kolyada, A.Yu. (2012). *Parametry protivopozharnykh razryvov v gornykh vyrabotkakh* [Parameters of fire breaks in mine workings]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 49, pp. 111 – 118.

2. Лапин К.И., Буряк Д.С. Противопожарный разрыв в сети горных выработок шахт // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – 2013. – Вып. 50. – С. 122 – 127.

Lapin, K.I., Buryak, D.S. (2013). *Protivopozharnyy razryv v seti gornykh vyrabotok shakht* [The fire break in the net of mine workings of the mines]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 50, pp. 122 – 127.

3. Ялоза В.В., Кителева Е.В. Расчет параметров железобетонных анкеров при креплении сопряжений капитальных горных выработок // Вестник Кузбасского государственного технического ун-та. – 2004. – Вып. 4. – С. 36 – 38.

Yaloza, V.V., Kiteleva, Ye.V. (2004). *Raschyet parametrov zhelezobetonnykh ankerov pri kreplenii sopryazheniy kapitalnykh gornykh vyrabotok* [Calculation of parameters of ferroconcrete anchors when stabilization of connections of permanent mine workings]. *Bulletin of the Kuznetsk Basin State Technical University*, vol. 4, pp. 36 – 38.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук И.Г. Стариковой.
Дата поступления рукописи 25.01.2016

Andrey Yuryevich Kolyada, head of department; e-mail: kolyada@ukr.net; Igor Felixovich Dikenshteyn, scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru; Artyem Alekseyevich Didenko, scientific associate; e-mail: didenartem89@gmail.com; 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 (+38062) 311-10-84; 311-39-70

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF THE COMBINED FIRE BREAK IN THE MINES

Purpose. Optimization of parameters of the combined fire break in the mine workings of the mines.

Methods. The mathematical analysis of results of minimization of expenditures for construction of the combined fire break.

Results. The problems of the combined effect of the fire break and water curtain by localization of the fires in the mine workings of the coal mines were considered. The use of the water curtain in combination with the fire break allows reducing the length of the fire break. The dependence of expenditures to create the zone of localization subject to the parameters of the fire, geometrical dimensions of the fire break and hydraulic parameters of the water curtain received. The optimum parameters of the combined fire break were obtained by means of minimization of the expenditures.

Practical value. The optimum parameters of the combined fire break device were determined in terms of the minimum expenditures for its construction.

Keywords: coal mine; mine working; fire; localization of the fire; fire gas; cooling the fire gases; fire break; water curtain; optimization.

УДК [543.544-414:543.544.3]:[547.284.3 + 547.532 + 547.533 + 547.272'92]

Алексей Андреевич Козлитин, нач. отд.; e-mail: kozlitin1942@mail.ru; Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru; Игорь Николаевич Непочатых, науч. сотр.; e-mail: tamdoka@mail.ru; Тамара Михайловна Лукомская, ведущий инж.; e-mail: ofhiip@mail.ru; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-39-91

ВЫБОР СОРБЕНТА ДЛЯ ЭКСПРЕССНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗОХРОМАТОГРАФИЧЕСКИМ МЕТОДОМ ИНИЦИАТОРОВ ГОРЕНИЯ В ПРОБАХ С МЕСТА ПОЖАРА

Цель. Выбор сорбента с быстрым массообменом между подвижной и неподвижной фазами для экспрессного хроматографического разделения компонентов исследуемой смеси.

Методы. Обоснование выбора инертных твёрдых носителей и неподвижных жидких фаз выполнено на основании анализа их физико-химических свойств информационно-аналитическим методом. Экспериментальные исследования проведены с использованием газожидкостной хроматографии.

Результаты. На основании информационно-аналитического анализа физико-химических свойств определены инертные твёрдые носители и неподвижные жидкие фазы, удовлетворяющие поставленной цели. Экспериментальным путём подтверждена возможность экспрессного определения ацетона, этилацетата, бензола и толуола на одной хроматографической колонке. Установлено, что наиболее эффективное разделение исследуемых компонентов, при индивидуальном и совместном их присутствии, обеспечивают колонки, заполненные хроматоном N-AW с 15 % полифенилового эфира 5ф-4э и инертном SUPER с 5 % OV-1 (от массовой доли твердого носителя для всех типов сорбента).

Научная новизна. Экспрессное и эффективное разделение смеси ацетона, этилацетата, бензола и толуола, относящихся к разным классам органических соединений, на одной хроматографической колонке. Это позволило избежать разработки отдельных методик определения исследуемых веществ.

Практическая значимость. Применение одной хроматографической колонки позволяет значительно сократить время анализа проб, изъятых с места пожара, что важно при проведении пожарно-технических экспертиз. Полученные результаты использованы при разработке методики определения методом газожидкостной хроматографии ацетона, этилацетата, бензола, толуола, использующихся в качестве инициаторов горения в пробах, отобранных с места пожара.

Ключевые слова: сорбент; массообмен; инертный твёрдый носитель; неподвижная жидкая фаза; ацетон; этилацетат; бензол; толуол; эффективность колонки; число теоретических тарелок; высота, эквивалентная теоретической тарелке; критерий разделения.

Постановка проблемы. Пожары как явление сопровождают человечество на протяжении всей его истории. Проблема установления достоверных причин возникновения пожаров не исчерпана и остаётся актуальной во все времена. Исследование пожара – это решение трудной задачи со многими неизвестными. Частой причиной пожаров является умышленный поджог. Во многих случаях веществами, инициирующими и ускоряющими пожар, могут быть различные легковоспламеняющиеся и горючие жидкости. При возникновении версии о поджоге одна из главных задач – обнаружение остатков инициаторов горения и дальнейшее их исследование в лабораторных условиях.

Для исследований были выбраны наиболее распространённые в быту горючие жидкости: ацетон, этилацетат, бензол и толуол, входящие в качестве

составных компонентов в большинство известных растворителей и разбавителей, наиболее доступных населению.

Актуальность темы. Ввиду того, что в настоящее время не изучены вопросы хроматографического разделения этих компонентов в пробах, отобранных в месте пожара, выбор сорбента для ускоренного и в то же время достаточно эффективного их обнаружения на одной колонке – актуальная задача.

Цель исследования. Цель исследования – выбор сорбента для ускоренного и наиболее эффективного разделения на одной хроматографической колонке ацетона, этилацетата, бензола и толуола, следы которых находятся в пробах, изъятых с места пожара.

Результаты исследований. Для решения поставленной задачи найдём связь между коэффициентом разделения и временем удерживания компонентов исследуемой смеси в колонке.

Коэффициент разделения определяют по уравнению

$$K_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} K_c \sqrt{\frac{L}{H}}, \quad (1)$$

где K_c – коэффициент селективности, равный $K_c = \frac{V_{g2} - V_{g1}}{V_{g2} + V_{g1}}$;

V_{g1} и V_{g2} – удерживаемые объёмы разделяемых компонентов 1 и 2, мм³;

L – длина слоя сорбента, мм;

H – высота, эквивалентная теоретической тарелке, мм.

Для получения зависимости между временем удерживания компонентов t и коэффициентом разделения K_1 воспользуемся формулой

$$t = \frac{L}{\bar{u}}, \quad (2)$$

где \bar{u} – средняя скорость перемещения компонента, равная $\bar{u} = \frac{u}{\Gamma}$, мм/с;

u – линейная скорость потока газа-носителя, рассчитанная на свободное сечение колонки, мм/с;

Γ – коэффициент Генри.

Тогда
$$t = \frac{L \Gamma}{u}. \quad (3)$$

Подставляя значение L из уравнения (3) в (1), получим

$$K_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} K_c \sqrt{\frac{u t}{\Gamma H}}. \quad (4)$$

Из уравнения Ван-Деемтера [1], графический вариант которого представлен на рис. 1:

$$H = A + \frac{B}{u} + Cu, \quad (5)$$

где A – коэффициент, учитывающий степень неоднородности структуры сорбента в колонке;

B – коэффициент, учитывающий вклад продольной диффузии данного сорбата в подвижной и неподвижной фазах;

C – коэффициент, определяющий массовый обмен сорбата между сорбентом (неподвижной фазой) и элюентом (подвижной фазой), учитывающий вклад поперечной диффузии;

u – линейная скорость потока газа-носителя, мм/с;

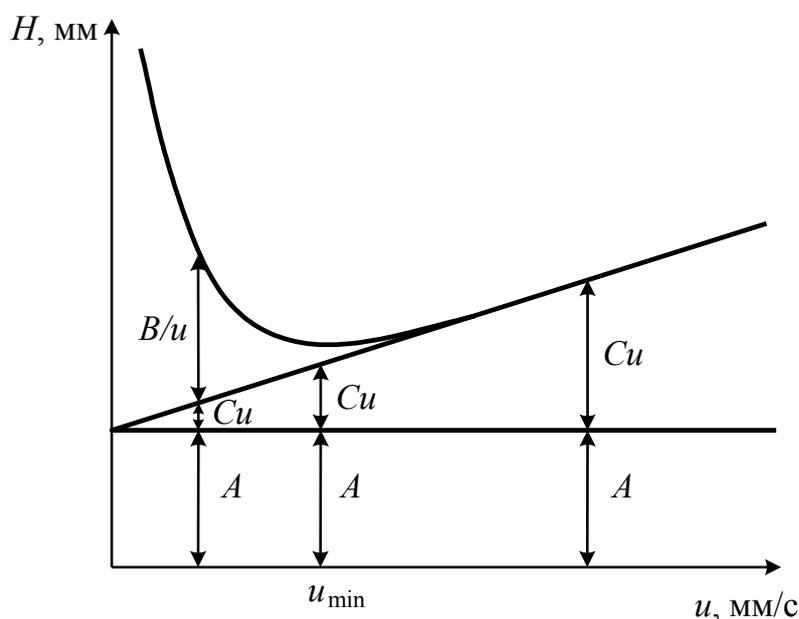


Рис. 1. Зависимость высоты, эквивалентной теоретической тарелке, от скорости потока газа-носителя

следует, что с увеличением скорости потока газа-носителя величина B/u стремится к 0, слагаемое A является постоянной величиной, наибольший вклад в уравнение (5) вносит коэффициент C – параметр, учитывающий скорость массопереноса в колонке.

С учетом вклада каждого из слагаемых в уравнение Ван-Деемтера зависимость (5) примет вид

$$H \approx Cu. \quad (6)$$

Однако увеличение скорости газа-носителя до некоторого предельного значения ведёт к увеличению высоты, эквивалентной теоретической тарелке, а, следовательно, к уменьшению эффективности колонки.

Подставляя H из равенства (6) в уравнение (4), получим зависимость коэффициента разделения компонентов исследуемой смеси от времени их нахождения в колонке и коэффициента C :

$$K_1 = \frac{\sqrt{2}}{4} K_c \sqrt{\frac{t}{\Gamma C}}. \quad (7)$$

Таким образом, для экспрессной хроматографии нужно выбирать сорбенты, на которых массоперенос происходит наиболее быстро, т.е. с малыми значениями параметра, учитывающего скорость массопереноса в колонке (коэффициента C).

С этой точки зрения выбираем для дальнейших исследований метод газожидкостной хроматографии, где используются твёрдые инертные носители, на поверхность которых равномерно наносится стационарная жидкая фаза, обеспечивая быстрый массообмен.

Главное назначение твёрдого носителя состоит в том, чтобы обеспечить достаточно большую и в то же время однородную поверхность, на которую равномерно наносится неподвижная жидкая фаза [1].

Слой жидкости на твёрдом носителе (неподвижная жидкая фаза) служит для улучшения и ускорения массового обмена разделяемых соединений между подвижной и неподвижной фазами [2]. К ним предъявляются следующие основные требования: термическая стабильность, химическая устойчивость, невысокая вязкость для хорошей смачиваемости носителя и нанесения на его поверхность равномерной плёнки, достаточная селективность для разделения веществ с близкими температурами кипения.

С целью эффективного разделения интересующих нас компонентов изучены твёрдые носители: хроматон N-AW, хроматон N-AW-DMCS, инертон AW-DMCS и инертон SUPER. В качестве неподвижных жидких фаз исследованы: полифениловый эфир 5ф-4э (высокомолекулярный полимер), апиэзон L (высоковакуумная смазка, содержащая углеводороды), сквалан (углеводороды насыщенной структуры), OV-1 (полиметилсилоксан).

Для экспериментов были приготовлены шесть хроматографических колонок (табл. 1).

Проведены сравнительные испытания подготовленных хроматографических колонок для выбора наиболее эффективной. Испытания проводили на газовом хроматографе модели 3700 в исполнении 3 при фиксированных параметрах анализа:

- температура термостата колонки 140 °С;
- температура детектора 190 °С;
- температура испарителя 200 °С;

- расход газа-носителя 30 мл/мин;
- расход воздуха 300 мл/мин;
- расход водорода 30 мл/мин.

Таблица 1

Состав хроматографических колонок

Номер колонки	Инертный твёрдый носитель	Количество неподвижной жидкой фазы	Зернение сорбента, мм
1	Хроматон N-AW	15 % полифенилового эфира 5ф-4э	0, 250...0,315
2	Хроматон N-AW	5 % полифенилового эфира 5ф-4э	0, 250...0,315
3	Хроматон N-AW-DMCS	15 % апиезона L	0, 250...0,315
4	Инертон AW-DMCS	10 % сквалана	0, 250...0,315
5	Инертон SUPER	3 % OV-1	0,160...0,200
6	Инертон SUPER	5 % OV-1	0,160...0,200

В работе использовали колонки длиной 3 м и внутренним диаметром 2 мм. На каждой колонке получены хроматограммы разделения смеси ацетона, этилацетата, бензола и толуола, определено время их удерживания, которое принято основным параметром идентификации компонентов смеси.

Для оценки селективности колонки определяли критерий разделения между наихудшим образом разделённой парой компонентов исследуемой смеси: ацетон-этилацетат, который должен быть не менее 1.

Порядок выхода разделяемых компонентов на хроматограммах следующий: 1 – ацетон; 2 – этилацетат; 3 – бензол; 4 – толуол (рис. 2).

После математической обработки полученных хроматограмм рассчитали основные параметры эффективности колонки: критерий разделения K , число теоретических тарелок n и высоту, эквивалентную теоретической тарелке H .

Критерий разделения вычисляли по формуле

$$K = \frac{\Delta t_R}{W_{0,5h(1)} + W_{0,5h(2)}}, \quad (8)$$

где Δt_R – разность времён удерживания для ацетона и этилацетата, с;

$W_{0,5h(1)}$ и $W_{0,5h(2)}$ – ширина хроматографических пиков, измеренная на половине их высоты и выраженная в единицах времени, с.

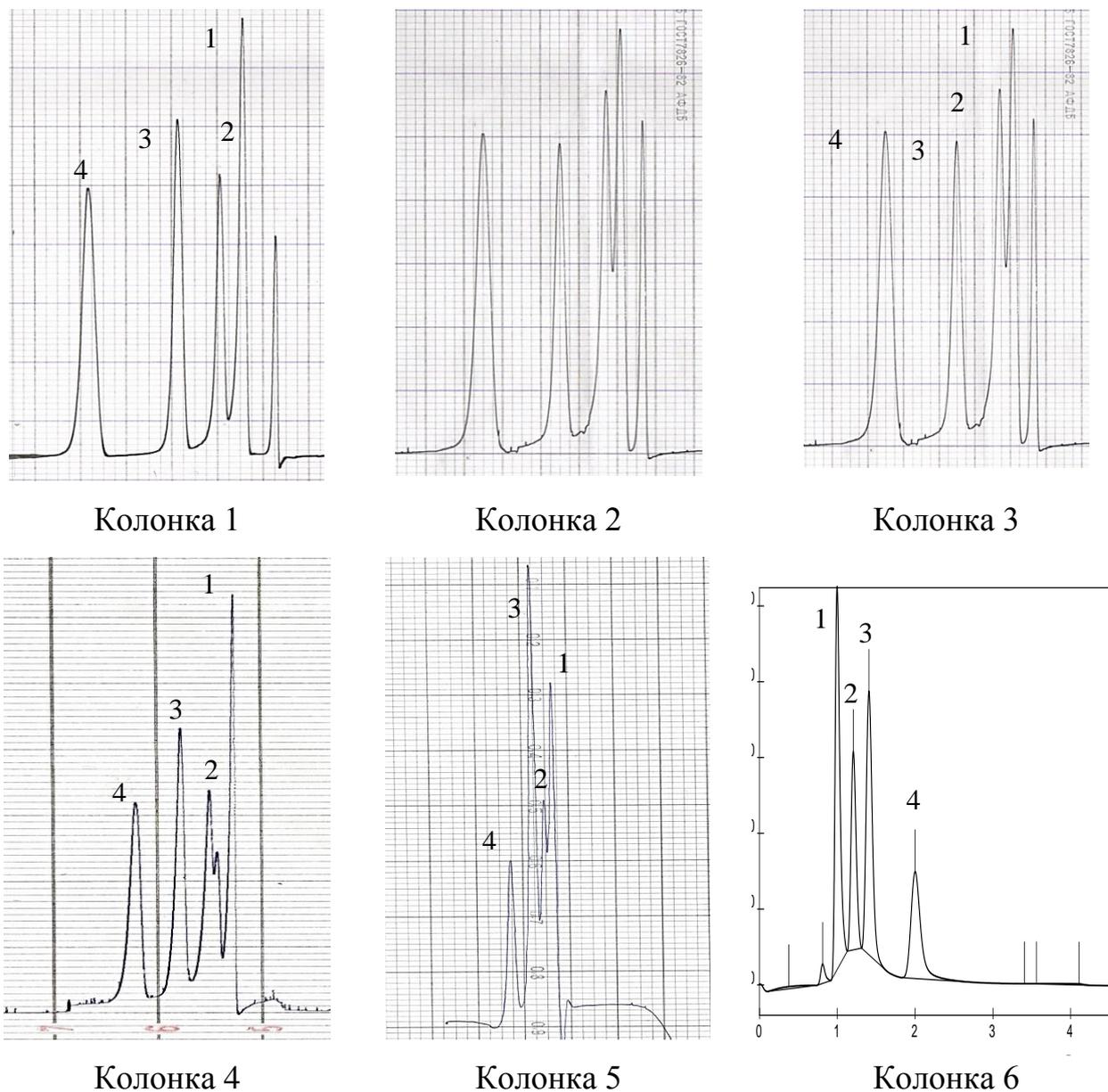


Рис. 2. Хроматограммы разделения исследуемой смеси на колонках 1 – 6

Для оценки эффективности газохроматографических колонок рассчитали (табл. 2):

- число теоретических тарелок

$$n = 5,545 \left(\frac{t_r}{W_{0,5h}} \right)^2, \quad (9)$$

где t_r – время хроматографического удерживания, с;

$W_{0,5h}$ – ширина хроматографического пика, измеренная на половине его высоты и выраженная в единицах времени, с;

- высоту, эквивалентную теоретической тарелке

$$H = L/n, \quad (10)$$

где L – длина слоя сорбента хроматографической колонки, мм;
 n – число теоретических тарелок.

Таблица 2

Результаты расчёта параметров эффективности колонок

Номер колонки	Определяемый компонент	Время удерживания, с	Число теоретических тарелок n	Высота, эквивалентная теоретической тарелке H , мм	Критерий разделения K
1	Ацетон	40	1105	2,72	1,4
	Этилацетат	49	1593	1,88	
	Бензол	68	1977	1,52	
	Толуол	106	1356	2,21	
2	Ацетон	36	312	9,62	0,6
	Этилацетат	42	425	7,07	
	Бензол	62	782	3,84	
	Толуол	102	906	3,31	
3	Ацетон	25	499	6,01	0,7
	Этилацетат	29	500	5,99	
	Бензол	40	1071	0,28	
	Толуол	60	1199	2,50	
4	Ацетон	16	88	3,41	0,3
	Этилацетат	18	312	0,96	
	Бензол	22	266	1,13	
	Толуол	26	289	1,04	
5	Ацетон	31	461	6,51	0,3
	Этилацетат	33	671	4,47	
	Бензол	36	1747	1,72	
	Толуол	40	1420	2,11	
6	Ацетон	60	1417	2,12	1,7
	Этилацетат	72	2066	1,45	
	Бензол	84	2092	1,43	
	Толуол	120	2598	1,15	

Сравнивая результаты табл. 2, установили, что наибольшие значения числа теоретических тарелок и критерия разделения (рис. 3) получено на хроматоне N-AW с 15 % полифенилового эфира 5ф-4э (колонка 1) и инертоне SUPER с 5 % OV-1 (колонка 6). Следовательно, наиболее эффективному и селективному разделению смеси ацетона, этилацетата, бензола и толуола соответствуют колонки 1 и 6.

Высота, эквивалентная теоретической тарелке, – параметр, характеризующий эффективность колонок 1-6, представлена на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что колонки 1 и 6 обладают наибольшей эффективностью, имея самые минимальные значения высоты, эквивалентной теоретической тарелке.

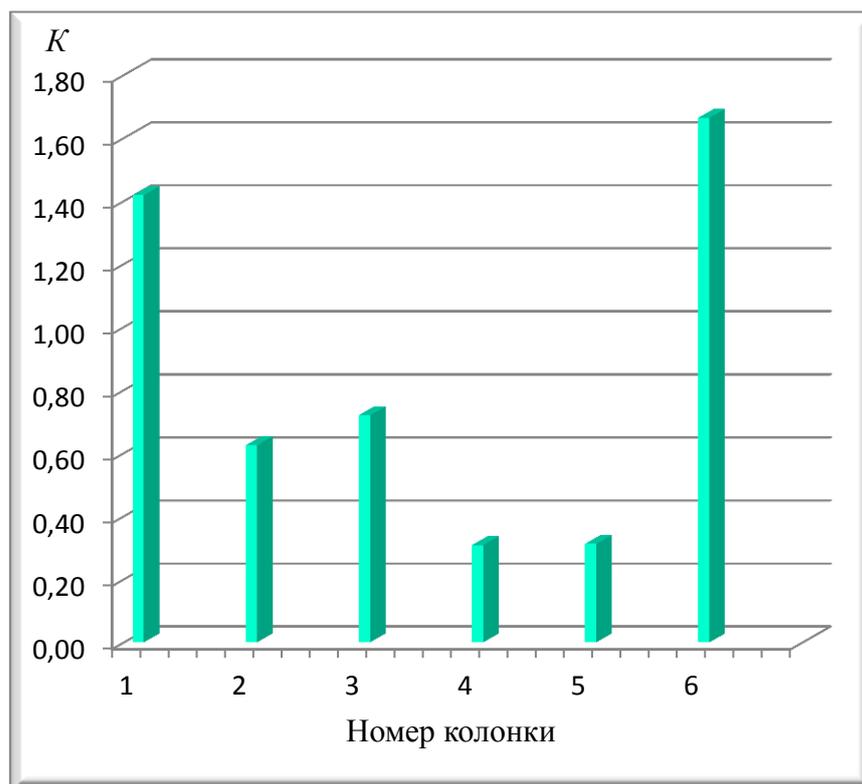


Рис. 3. Критерий разделения компонентов на различных колонках

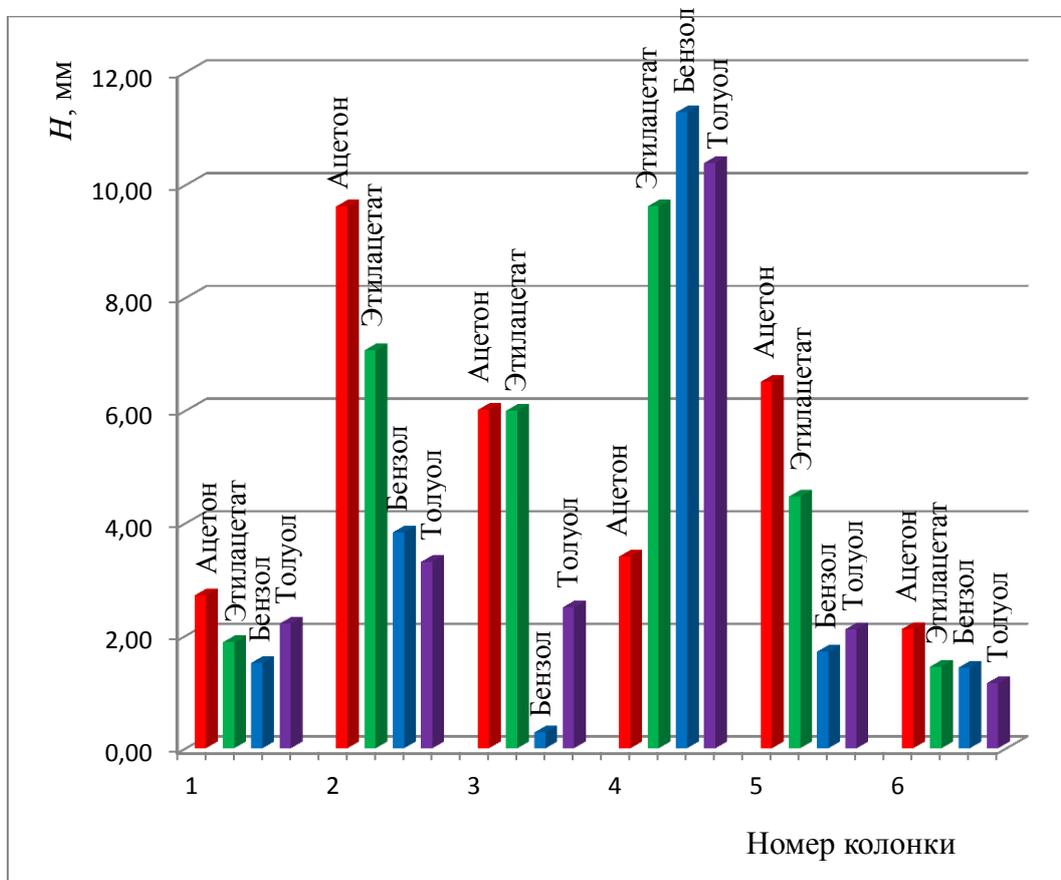


Рис. 4. Высота, эквивалентная теоретической тарелке, на колонках 1-6

Выводы:

- выбраны сорбенты с быстрым массообменом между подвижной и неподвижной фазами: хроматон N-AW с 15 % полифенилового эфира 5ф-4э и инертон SUPER с 5 % OV-1, которые позволяют ускоренно разделить на одной хроматографической колонке ацетон, этилацетат, бензол, толуол в исследуемой среде;
- эффективное разделение смеси исследуемых веществ на одной хроматографической колонке позволило избежать разработки отдельных методик;
- экспрессное разделение указанных выше горючих жидкостей позволяет значительно сократить время хроматографического анализа до 2 мин, что важно при проведении пожарно-технических экспертиз проб, изъятых с места пожара;
- на основании полученных результатов разработана методика определения ацетона, этилацетата, бензола и толуола в исследуемой среде методом газовой хроматографии.

Список литературы / References

1. Техническое обеспечение расследования поджогов, совершенных с применением инициаторов горения: учебно-методическое пособие / И.Д. Чешко, М.А. Галишев, С.В. Шарапов, Н.И. Кривых. – М.: ВНИИПО, 2002. – 120 с.

Cheshko, I.D., Galishev, M.A., Sharapov, S.V., Krivykh, N.I. (2002). *Tekhnicheskoye obespecheniye rassledovaniya podzhogov, sovershennykh s primeneniym initsiatorov goreniya* [Technical security of investigation of arsons performed with the use of combustion initiators]. Moscow: VNIPO, 120 p.

2. Царёв Н.И., Царёв В.И., Катраков И.Б. Практическая газовая хроматография: учебно-методическое пособие для студентов химического факультета по спецкурсу «Газохроматографические методы анализа». – Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2000. – 156 с.

Tsaryev, N.I., Tsaryev, V.I., Katrakov, I.B. (2000). *Prakticheskaya gazovaya khromatografiya* [Practical gas chromatography]. Barnaul: Altaic University Press, 156 p.

Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru; *Victoria Valentinovna Lebedeva*, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru; *Igor Nikolayevich Nepochatykh*, scientific associate; e-mail: tamdoka@mail.ru; *Tamara Mikhaylovna Lukomskaya*, leading engineer; e-mail: ofhiip@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 (+38062) 311-339-91

CHOICE OF A SORBENT FOR THE EXPRESS DETERMINATION OF COMBUSTION INITIATORS IN THE SAMPLES TAKEN FROM A SITE OF THE FIRE USING THE GASCHROMATOGRAPHIC METHOD

Purpose. Choice of the sorbent with the prompt mass exchange between the active and stationary phases for express chromatographic separation of components of the mixture being investigated.

Methods. The substantiation of the choice of inert solid carriers and stationary liquid phases is fulfilled on the basis of analysis of their physical and chemical properties by means of the information and analytical method. The experimental investigations were carried out with the use of the gas-liquid chromatography.

Results. On the basis of the information and analytical analysis of the physical and chemical properties the inert solid carriers and stationary liquid phases satisfied the goal set were determined. The possibility of the express determination of acetone, ethyl acetate, benzene and toluene using one chromatographic column was confirmed in an experimental way. It was ascertained that the columns filled with chromatone N-AW with 15 percent of polyphenyl ether 5φ-4э and inertone SUPER with 5 percent of OV-1 (from the mass portion of the solid carrier for all types of the sorbent) ensure the most effective separation of the components being investigated by their individual and joint availability.

Scientific novelty. The express and effective separation of the mixture of acetone, ethyl acetate, benzene and toluene attributed to various classes of organic compounds using one chromatographic column. It permitted to avoid the working-out of the separate methods of determination of the substances being investigated.

Practical value. The application of one chromatographic column makes it possible to cut considerably the time of analysis of the samples taken from the site of the fire, what is important by carrying-out the fire and technical examinations. The results received were used by working-out the methods of determination of acetone, ethyl acetate, benzene and toluene being used as combustion initiators in the samples taken from the site of the fire. For this purpose the gas-liquid chromatography method was used.

Keywords: *sorbent; mass exchange; inert solid carrier; stationary liquid phase; acetone; ethyl acetate; benzene; toluene; efficiency of the column; number of theoretical plates; height, being equivalent to the theoretical plate; criterion of separation.*

УДК 614.841.412:629.463.32/.33

Батыр Джунисбаевич Инкарбаев, ст. науч. сотр.; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; e-mail: in.boris@list.ru; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-39-62

**ПРОЦЕСС ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ ПРИ АВАРИИ
С ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫМИ ЦИСТЕРНАМИ**

Цель. Исследовать процесс развития горения углеводородов при авариях, связанных с железнодорожными цистернами, в начальной стадии развития пожара для оценки влияния параметров разливания жидкости на интенсивность теплового потока при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Методика. Теоретический анализ теплообменных процессов при внешнем тепловом воздействии от горячей цистерны и горения вокруг нее на расположенные рядом цистерны.

Результаты. Определен алгоритм расчета процесса горения сжиженных углеводородных газов и жидких углеводородов с учетом особенностей теплообменных процессов при развитии пожара на открытой поверхности растекания в условиях аварийной ситуации на железнодорожном транспорте. Дана оценка возможной площади растекания сжиженных углеводородов при возникновении чрезвычайной ситуации. Исследованы особенности развития процесса их горения в начальной стадии пожара.

Научная новизна. На основании проведенного аналитического исследования различных вариантов методик расчетов по определению масштабов растекания сжиженных углеводородов при аварии с железнодорожными цистернами были предложены наиболее приемлемые варианты расчетов, учитывающие характер поверхности, где произошло растекание.

Практическая значимость. Результаты расчета могут быть использованы при оценке интенсивности теплового потока от горящих сжиженных углеводородных газов и жидких углеводородов в герметизированной железнодорожной цистерне в зависимости от рельефа местности.

Ключевые слова: *пожар; сжиженные углеводородные газы; жидкие углеводороды; чрезвычайная ситуация; горение; железнодорожные цистерны; пожарно-спасательные подразделения.*

Введение. Анализ происшедших аварий, ежегодно возникающих на железнодорожном транспорте при транспортировании железнодорожных цистерн со сжиженными углеводородными газами, жидкими углеводородами показал, что для их ликвидации требуется привлечение большего количества сил и средств пожарно-спасательных подразделений. К примеру, пожар происшедший 02.02.2014 на территории Донецкой области, когда сошло с рельсов 26 железнодорожных цистерн с пропан-бутаном. Данные пожары носят затяжной характер, так как в начальной стадии их развития создается сложная обстановка, характеризующаяся быстрым распространением горения по разлитым веществам на большие площади. При этом высокая испаряемость и парообразующая способность углеводородов обуславливают высокую скорость их выгорания и значительные размеры площади горения в начальной стадии пожара.

Постановка проблемы. Ввиду того, что в значительной мере на исход тушения указанных пожаров влияет характер и особенности развития процесса горения углеводородов, основной составляющей которого является тепловое излучение пламени, необходимо провести математическое моделирование теплообменных процессов в условиях данной чрезвычайной ситуации, определить угрозу и масштабы растекания углеводородов на аварийной территории.

Формулирование цели работы и постановка задач. При ликвидации пожара на железнодорожном транспорте основную угрозу представляют термическое воздействие пламени и распространение горения по разлившейся горючей жидкости от горящей цистерны на соседние, а также на прилегающую к месту аварии территорию. Поэтому одной из важных задач для руководителя тушения пожара и ликвидации аварии является оценка влияния интенсивности теплового воздействия от горения углеводородов не только на рядом расположенное оборудование, соседние цистерны, но и на личный состав пожарно-спасательных подразделений и технику, принимающие участие в тушении пожара. Проанализировать факторы и параметры, влияющие на интенсивность теплового потока горящей жидкости на открытой поверхности – цель данной работы.

Основные задачи данной работы:

- оценка воздействия интенсивности теплового потока от горящей цистерны на цистерны, расположенные с ней рядом, в условиях их опрокидывании с рельсов и дальнейшего распространения горения по разлившемуся продукту на аварийной территории;
- анализ возможных масштабов растекания горючей жидкости на открытой местности, где произошла авария.

Анализ последних исследований и публикаций. В работе [1] предложена математическая модель теплового воздействия пожара разлившейся горючей жидкости на железнодорожную цистерну и предполагается, что растекание имеет форму круга известной площади. При этом зависимость площади растекания, толщины слоя и времени горения от вылившегося объёма жидкости не рассмотрена. Предложенная в работе [2] формула по определению площади растекания различных жидкостей в результате чрезвычайной ситуации, связанной с аварийной разгерметизацией железнодорожной цистерны, требует доработки, так как при умножении объёма и безразмерного коэффициента в данной формуле вычислить прогнозируемую площадь растекания жидкости практически не реально.

Материалы и результаты исследований. НИИГД «Респиратор» сделан вывод, что при горении углеводородов создается температура порядка 1500 °С, мощное тепловое излучение, быстрое распространение огня по разлившейся поверхности горючей жидкости, опасность взрыва внутри емкостей и снаружи от теплового воздействия огня, опасность образования «огненного шара», угроза загазования места аварии и прилегающей территории, вероятность необходимости эвакуации населения из опасных зон. Учитывая многообразие выявленных опасных и сложных процессов развития пожара при горении углеводородов, в статье не рассмотрены расчеты интенсивности теплового излучения «огненного шара» и времени его существования, а также распространение облака испарившегося газа или паров жидких углеводородов с последующим возможным дефлаграционным взрывом газопаровоздушной смеси, изложенные в работе [3]. Проблемными остаются вопросы оповещения

и информирования о чрезвычайной ситуации населения, оказавшегося в зоне загазованности, т.е. на территории, прилегающей к месту аварии.

В данной статье раскрыт характер и особенности развития пожара в начальной стадии его развития. Из всех возможных вариантов развития пожара и в целом чрезвычайной ситуации выбран самый неблагоприятный, то есть когда в результате крушения происходит опрокидывание и разгерметизация железнодорожных цистерн. В зависимости от масштабов аварии разливается транспортируемое вещество из горящей цистерны и распространяется горение на большие площади, которые можно вычислить. В результате горения происходит мощное тепловое излучение от горящей цистерны на соседние, в результате чего последние начинают нагреваться и если не принять оперативных мер, то температура нагревания может достичь критических значений.

За основу расчетов принимаем условие, при котором интенсивность теплового потока q оказывает воздействие на соседние цистерны в результате растекания транспортируемого вещества на аварийной площадке.

Интенсивность теплового излучения q , кВт/м², рассчитываем по формуле [4]

$$q = E_f F_q \tau, \quad (1)$$

где E_f – среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени, кВт/м² (см. таблицу);

F_q – угловой коэффициент облученности;

τ – коэффициент пропускания атмосферы.

Значение E_f принимают на основе имеющихся экспериментальных данных.

Для некоторых жидких углеводородных топлив указанные данные приведены в таблице.

Среднеповерхностная плотность теплового излучения пламени E_f в зависимости от диаметра очага d и удельной массовой скорости выгорания m для некоторых жидких углеводородных топлив

Топливо	E_f , кВт/м ² , при d , м					m , кг/(м ² ·с)
	10	20	30	40	50	
Метан	220	180	150	130	120	0,08
Пропан-бутан	80	63	50	43	40	0,1
Бензин	60	47	35	28	25	0,06
Дизельное топливо	40	32	25	21	18	0,04
Нефть	25	19	15	12	10	0,04

Примечание. Для очага диаметром менее 10 м или более 50 м следует принимать E_f такой же, как и для очагов диаметром 10 и 50 м соответственно

При отсутствии данных допускается E_f принимать равной 100 кВт/м² для метана, 40 кВт/м² для нефтепродуктов.

Рассчитываем эффективный диаметр растекания d , м, по формуле

$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}}, \quad (2)$$

где S – площадь растекания, м².

Рассчитываем высоту пламени H , м, по формуле

$$H = 42d \left(\frac{m}{\rho_B \sqrt{gd}} \right)^{0,61}, \quad (3)$$

где m – удельная скорость выгорания топлива, кг/(м·с);

ρ_B – плотность окружающего воздуха, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, равное 9,81 м/с².

Определяем угловой коэффициент облученности F_q по формуле

$$E_q = \sqrt{F_V^2 + F_H^2}, \quad (4)$$

где F_V , F_H – факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок соответственно.

Определяем фактор облученности для вертикальной площадки F_V по формуле

$$F_V = \frac{1}{\pi} \left[-E \arctg D + E \left(\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2b(1+a \sin \theta)}{AB} \right) + \arctg \left(\frac{AD}{B} \right) + \frac{\cos \theta}{C} \times \right. \\ \left. \times \left(\arctg \left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{F \cdot C} \right) + \arctg \left(\frac{F^2 \sin \theta}{FC} \right) \right) \right]. \quad (5)$$

Определяем фактор облученности для горизонтальной площадки F_H по формуле

$$F_H = \frac{1}{\pi} \left[\begin{array}{l} \arctg\left(\frac{1}{D}\right) + \frac{\sin \theta}{C} \left(\arctg\left(\frac{ab - F^2 \sin \theta}{FC}\right) + \arctg\left(\frac{F^2 \sin \theta}{FC}\right) \right) - \\ - \left(\frac{a^2 + (b+1)^2 - 2(b+1 + ab \sin \theta)}{AB} \right) \arctg\left(\frac{AD}{B}\right) \end{array} \right], \quad (6)$$

где a, b, A, B, C, D, E, F – расчетные коэффициенты, определяемые с помощью выражений

$$a = \frac{2L}{d}; \quad (7)$$

$$b = \frac{2X}{d}; \quad (8)$$

$$A = \sqrt{\left(a^2 + (b+1)^2 \right) 2a(b+1) \sin \theta}; \quad (9)$$

$$B = \sqrt{\left(a^2 + (b-1)^2 \right) 2a(b-1) \sin \theta}; \quad (10)$$

$$C = \sqrt{\left(1 + (b^2 - 1) \cos^2 \theta \right)}; \quad (11)$$

$$D = \sqrt{\frac{b-1}{b+1}}; \quad (12)$$

$$E = \frac{a \cos \theta}{b - a \sin \theta}; \quad (13)$$

$$F = \sqrt{b^2 - 1}, \quad (14)$$

X – расстояние от геометрического центра растекания до облучаемого объекта, м;

d – эффективный диаметр растекания, м;

L – высота пламени, м;

θ – угол отклонения пламени от вертикали под действием ветра, ...°.

Для площадок, расположенных вне указанного сектора, а также в случаях отсутствия ветра факторы облученности для вертикальной и горизонтальной площадок рассчитывают по формулам (5) – (14), принимая $\theta = 0$.

Определяем коэффициент пропускания атмосферы τ по формуле

$$\tau = \exp\left[-7,0 \cdot 10^{-4}(r - 0,5d)\right]. \quad (15)$$

Для оценки площади растекания горючей жидкости при аварии с железнодорожными цистернами рассмотрим ситуацию, на которую влияет характер поверхности, где произошло растекание (угол наклона, твердость грунта, покрытия).

При авариях на железнодорожных перегонах, территориях, не имеющих защитных ограждений, происходит растекание жидкости по грунту и (или) заполнение естественных впадин. Обычно при растекании по грунту площадь его ограничена естественными и искусственно созданными границами (дороги, дренажные каналы и т.п.), а если информация об этом отсутствует, то принимается толщина разлившегося слоя, равной $h = 0,05$ м, и определяют площадь растекания F , м², по формуле

$$F = \frac{m}{h\rho_g}, \quad (16)$$

где m – масса разлившейся жидкости, кг;

ρ_g – плотность жидкости, кг/м³;

h – толщина разлившегося слоя жидкости, равная 0,05 м.

Для более точной оценки площади растекания S_p , м², при полном разрушении цистерны можно воспользоваться следующей формулой:

$$S_p = f n V_{жс}, \quad (17)$$

где f – коэффициент растекания, м⁻¹;

n – степень заполнения цистерны (допускается до 0,85);

$V_{жс}$ – вместимость цистерны, м³.

Коэффициент растекания определяют исходя из расположения цистерны на местности:

$f = 5$ – при расположении в низине или на ровной поверхности с уклоном до 1 %;

$f = 12$ – при расположении на возвышенности.

В зависимости от расположения цистерны на местности принимают различные приведенные формы растекания жидкости:

- при расположении цистерны в низине или на ровной поверхности растекание имеет форму круга с радиусом R_p , м, который определяют по формуле

$$R_p = (S_p/\pi)^{1/2}, \quad (18)$$

- при расположении цистерны на возвышенности растекание имеет форму эллипса. Значения осей b и a , м, эллипса определяют по следующим формулам:

$$\text{для большой полуоси } b = (K_{\text{ук}} S_p/\pi)^{1/2}; \quad (19)$$

$$\text{для малой полуоси } a = 4S_p/(\pi + b), \quad (20)$$

где $K_{\text{ук}}$ – коэффициент, характеризующий уклон местности.

При уклоне от 1 до 3 % $K_{\text{ук}} = 8$; более 3 % $K_{\text{ук}} = 16$.

Вывод. Исследованы особенности развития процесса горения сжиженных углеводородных газов и жидких углеводородов при их растекании на открытой поверхности в условиях аварийной ситуации на железнодорожном транспорте. Результаты аналитических исследований показали, что на интенсивность теплового потока при возникновении чрезвычайной ситуации влияет вид жидкости и параметры ее растекания, зависящие от характера поверхности территории.

Список литературы / References

1. Безопасность жизнедеятельности. Безопасность в чрезвычайных ситуациях природного и техногенного характера: учеб. пособие / В.А. Акимов, Ю.Л. Воробьев, М.И. Фалеев и др. – 2-е изд., перераб. – М.: Высш. шк., 2007. — 592 с.

Akimov, V.A., Vorobyev, Yu.L., Faleyev, M.I. etc. (2007). *Bezopasnost zhiznedeyatel'nosti. Bezopasnost v chrezvychaynykh situatsiyakh prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera* [Safety in emergencies of the natural and anthropogenic character]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 592 p.

2. Астахов П.В., Демченко Н.А., Рубцов Ю.Н. Особенности моделирования пожара на объектах железнодорожного транспорта // Чрезвычайные ситуации: образование и наука. – 2011. – Т. 6, № 1. – С. 45 – 48.

Astakhov, P.V., Demchenko, N.A., Rubtsov, Yu.N. (2011). *Osobennosti modelirovaniya pozhara na obyektakh zheleznodorozhnogo transporta* [Peculiarities of modeling the fire on rail mode objects]. *Chrezvychaynyye situatsii: obrazovaniye i nauka*, vol. 6, no. 1, pp. 45 – 48.

3. Агеев В.Г., Маркин А.Я. Методологические основы определения зон поражения при взрывах паровоздушных смесей // Вестник Института гражданской защиты Донбасса. – 2015. – Вып. 4. – С. 6 – 10.

Ageyev, V. G., Markin, A.Ya. (2015). *Metodologicheskiye osnovy opredeleniya zon porazheniya pri vzryvakh vozdushnykh smesey* [Methodological fundamentals of estimation of effective zones by explosions of steam-air mixtures]. *Bulletin of the Institute of Civil Protection of the Donbass*, issue 4, pp. 6 – 10.

4. ГОСТ 12.3.047-2012. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля.

GOST 12.3.047-2012. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 25.01.2016

Batyr Dzhunisbayevich Inkarbayev, senior scientific associate; the “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR; e-mail: in.boris@list.ru; 283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38062) 311-39-62

THE PROCESS OF COMBUSTION OF HYDROCARBONS BY AN ACCIDENT WITH RAIL TANK CARS

Purpose. To investigate the process of development of combustion of hydrocarbons by accidents connected with the rail tank cars at the initial stage of development of the fire to estimate the influence of parameters spreading on intensity of the heat flow by origin of the emergencies.

Methods. Theoretical analysis of the heat exchange processes by of the liquid the external heat influence from the tank being on fire and burning around it on the tank cars neighbored.

Results. The algorithm of calculation of the process of combustion of liquefied hydrocarbon gases and liquid hydrocarbons subject to peculiarities of the heat exchange processes by development of the fire on the open spreading surface under conditions of the emergency on the rail mode was determined. The estimation of the possible area of the spreading of the liquefied hydrocarbons by origin of the emergency was given. The peculiarities of development of the process of their combustion in the initial stage of the fire were investigated.

Scientific novelty. On the basis of the analytical investigation of various variants of calculation methods to determine the scales of the spreading of the liquefied hydrocarbons by the accident with the rail tank cars the more acceptable variants of the calculations subject to the character of the surface where the spreading occurred were proposed.

Practical value. The calculation results may be used by estimation of intensity of the heat flow from the liquefied hydrocarbon gases and liquid hydrocarbons being on fire in the hermetically sealed rail tank car depending on the lay of land.

Keywords: fire; liquefied hydrocarbon gases; liquid hydrocarbons; emergency; combustion; rail tank cars; fire life-saving subdivisions.

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.843.8

Петр Семенович Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по научной работе; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; e-mail: niigd@mail.ru; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-69-77

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ПЕНООБРАЗОВАНИЯ В ГЕНЕРАТОРАХ С ПРИНУДИТЕЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ВОЗДУХА

Цель. Определение условий устойчивого процесса генерирования воздушно-механической пены средней и низкой кратности на сетках при принудительной подаче воздуха.

Методика. Аналитические и экспериментальные исследования процессов генерирования пены на сетках.

Результаты. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили установить взаимосвязь между давлением и скоростью подачи воздуха, что обеспечивает устойчивый режим пенообразования на сетках.

Научная новизна. Раскрыты особенности образования воздушно-механической пены на сетках при принудительной подаче воздуха.

Практическая значимость. Предложен методический подход к обоснованному выбору вентиляторов для разработки пеногенераторов с принудительной подачей воздуха.

Ключевые слова: пенообразование; пенообразующий состав; пеногенератор; принудительная подача воздуха.

Постановка задачи. Газомеханическая пена находит довольно широкое применение в профилактике и тушении пожаров, особенно эндогенного происхождения [1]. Это обусловлено тем, что она может быть доставлена на большие расстояния, в труднодоступные места, где, как правило, и возникают эндогенные пожары. Механизм ее действия на очаги самонагрева и самовозгорания изучен в достаточной степени. Однако способы и средства генерирования пены нуждаются в дальнейшем совершенствовании [2].

Доставляют пену в труднодоступные места, на значительные расстояния, до 2 км и более, по трубопроводам или скважинам диаметром до 0,1 м. Для этого необходима мелкоячеистая, структурированная пена [3]. Ее можно получить только с использованием генераторов с принудительной подачей воздуха [4]. Изучение особенностей этого процесса и явилось целью данных исследований.

Результаты исследований. Процесс пенообразования в генераторах с принудительной подачей воздуха происходит в результате выдувания пузырьков пены на сетках, орошаемых водным раствором пенообразователя.

Оптимальные условия пенообразования обеспечивает подача воздуха при давлении, соответствующем полному развитию пузырька и равномерному орошению сетки. На ячейку сетки (рис. 1) движутся поток воздуха и капли раствора пенообразователя. Капли, соприкасаясь с ячейкой сетки, смачивают ее, и остаются на сетке, создавая пленочный слой, который перекрывает все ее ячейки.

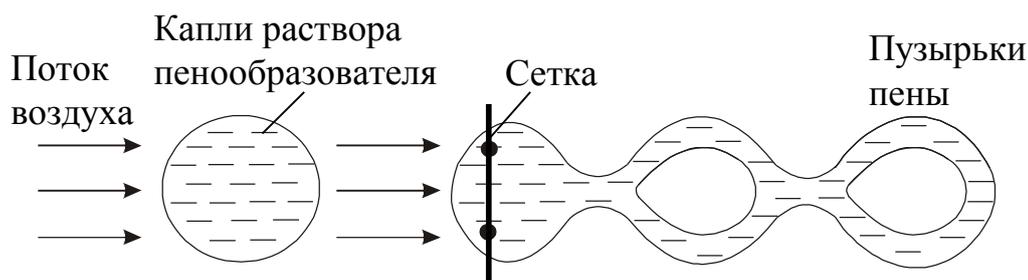


Рис. 1. Схема образования пузырьков пены на одной ячейке сетки

Под действием потока воздуха пленочный слой деформируется до тех пор, пока следующие капли не создадут на сетке пленочный слой. Таким образом происходит образование пенного потока, скорость которого зависит от расхода воздуха и раствора пенообразователя.

При пенообразовании расходуется энергия воздушного потока и раствора пенообразователя. Работа, затраченная на пенообразование, складывается из работы по изменению пленочного слоя, работы по преодолению сопротивления перемещению поверхности растущего пузырька и гидравлического сопротивления сетки. Ввиду того, что работа по образованию пузырька более чем в 17 раз [5] превышает работу, затрачиваемую на перемещение поверхности пузырька, закон сохранения энергии будет иметь вид

$$\rho_{\text{в}} q_{\text{в}} \frac{q_{\text{в}}^2}{2S^2} + \rho_{\text{ж}} q_{\text{ж}} \frac{q_{\text{ж}}^2}{2S^2} + q_{\text{в}} \Delta P_{\text{в}} = \rho_{\text{п}} q_{\text{п}} \frac{q_{\text{п}}^2}{2S^2} + \sigma \frac{dF}{d\tau} + \Delta E, \quad (1)$$

где $\rho_{\text{в}}$, $\rho_{\text{ж}}$ и $\rho_{\text{п}}$ — плотности соответственно воздуха, жидкости и пены, кг/м³;
 $q_{\text{в}}$, $q_{\text{ж}}$ и $q_{\text{п}}$ — расход соответственно воздуха, жидкости и пены, м³/с;
 S — площадь пеногенераторной сетки, м²;
 $\Delta P_{\text{в}}$ — статическое давление воздуха, Па;
 σ — коэффициент поверхностного натяжения, Н/м;
 $\frac{dF}{d\tau}$ — скорость изменения поверхности пузырька, м²/с;
 ΔE — потери энергии на гидравлическое сопротивление сеток в единицу времени, Дж/с.

Плотность и расход пены определяют по формулам

$$\rho_{\text{п}} = \rho_{\text{в}} + \frac{\rho_{\text{ж}}}{K}, \quad (2)$$

где $K = \frac{q_{\text{в}} + q_{\text{ж}}}{q_{\text{ж}}}$ — кратность пены;

$$q_{\text{п}} = q_{\text{в}} + q_{\text{ж}} \cong q_{\text{в}}. \quad (3)$$

Используя известную формулу С.С. Кутателадзе, потери энергии на преодоление гидравлического сопротивления сеток можно выразить

$$\Delta E = \xi \frac{\rho_{см} v_0^2}{2} q_{п}, \quad (4)$$

где ξ – коэффициент гидравлического сопротивления, Па·с/м²;
 $\rho_{см}$ – плотность пенообразующей смеси, кг/м³;
 v_0 – скорость двухфазного потока, м/с.

После несложных преобразований и учитывая, что $\frac{q_B}{q_K} = K$, уравнение (1) запишем в виде

$$\Delta P_B = \rho_{п} \frac{q_{п}^2}{2S^2} + \frac{\sigma}{q_B} \frac{dF}{d\tau} + \xi \frac{\rho_{см} v_0^2}{2} - \rho_B \frac{q_B^2}{2S^2} - \frac{\rho_{ж}}{K} \frac{q_{ж}^2}{2S^2}. \quad (5)$$

Так как работа потоков воздуха и жидкости незначительна, то с достаточной степенью точности можно записать, что

$$\Delta P_B = \frac{\sigma}{q_B} \frac{dF}{d\tau} + \xi \frac{\rho_{см} v_0^2}{2}. \quad (6)$$

Для получения устойчивого и стационарного режима пеногенерации необходимо, чтобы при случайном попадании капли на сетку она доставала хотя бы одну элементарную ячейку, для чего должно выполняться условие (рис. 2)

$$r \geq a\sqrt{2} \approx \frac{3}{2}a, \quad (7)$$

где r – радиус капли, м;
 a – размер ячейки сетки, м.

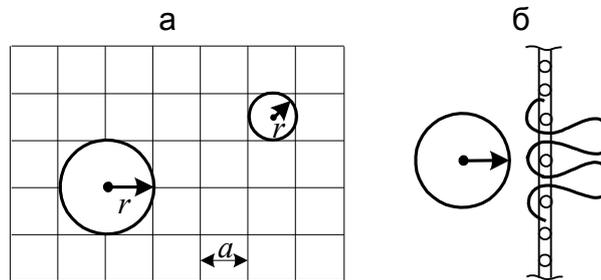


Рис. 2. Схема процесса пеногенерации:

а – возможное попадание капель на сетку; б – эволюция капли в пузырек

Пузырек пены можно представить как идеальный многогранник, в результате чего поверхность пузырька выразить через его объем:

$$F = \alpha_0 V_{\text{пуз}}^{\frac{2}{3}}, \quad (8)$$

где F – поверхность пузырька, м^2 ;

α_0 – структурный фактор (для шара $\alpha_0 = [36\pi]^{\frac{1}{3}}$), $1/\text{м}$;

$V_{\text{пуз}}$ – объем пузырька, м^3 .

Если время формирования и отрыва пузырька τ_0 , то объем его будет

$$V_{\text{пуз}} = q_{\text{ж}} \tau_0 \frac{a^2}{S} K. \quad (9)$$

За время формирования пузырька можно принять время полного перекрывания каплями всей площади сетки. В этом случае

$$\tau_0 = \frac{4Sr}{3q_{\text{ж}}}. \quad (10)$$

Подставляя выражения (10) и (9) в (8), находим

$$F = \alpha_0 a^2 \left(\frac{4}{3} K \frac{r}{a} \right)^{2/3}. \quad (11)$$

Выражая производную через приращения, получим

$$\left[\frac{\sigma}{q_{\text{в}}} \frac{dF}{d\tau} \right] \approx \frac{\sigma}{q_{\text{в}}} \frac{\Delta F}{d\tau} = \frac{\sigma}{q_{\text{в}}} \frac{2F}{\tau_0} \frac{S}{a^2} = \frac{2\alpha_0 \sigma}{a} \left(\frac{4}{3} K \frac{r}{a} \right)^{-\frac{1}{3}}. \quad (12)$$

Таким образом,

$$\Delta P_{\text{в}} = \frac{2\alpha_0 \sigma}{a} \left(\frac{4}{3} K \frac{r}{a} \right)^{-\frac{1}{3}} + \xi \frac{\rho_{\text{п}} v_{\text{п}0}^2}{2}. \quad (13)$$

Экспериментальные исследования [6] показали, что при определенных расходах раствора пенообразователя скорость капли намного превышает скорость воздуха, что способствует созданию эжекции порядка 60 Па. При кратности пены > 400 эжекция не наблюдалась.

Данные экспериментальных исследований зависимости коэффициента гидравлического сопротивления ξ от коэффициента живого сечения сеток и кратности пены представлены на графике (рис. 3).

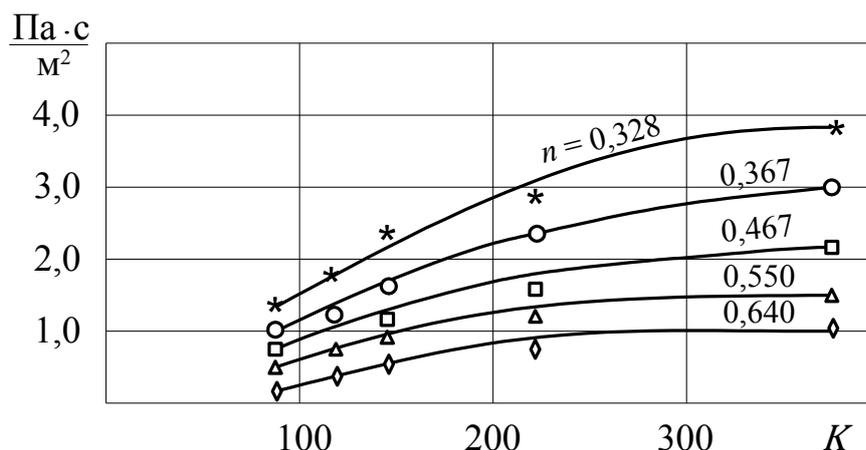


Рис. 3. Зависимость коэффициента гидравлического сопротивления от коэффициента живого сечения и кратности пены

Обработка экспериментальных данных позволила получить формулы:
при $K \geq 400$

$$\xi = 8,25(1 - e^{-0,00315 K}) (n - 1)^2; \quad (14)$$

при $K < 400$

$$\xi = 0,026K(n - 1)^2, \quad (15)$$

где K – кратность пены;

$n = \frac{S_{ж}}{S}$ – коэффициент живого сечения;

$S_{ж}$ – площадь живого сечения сетки, m^2 ;

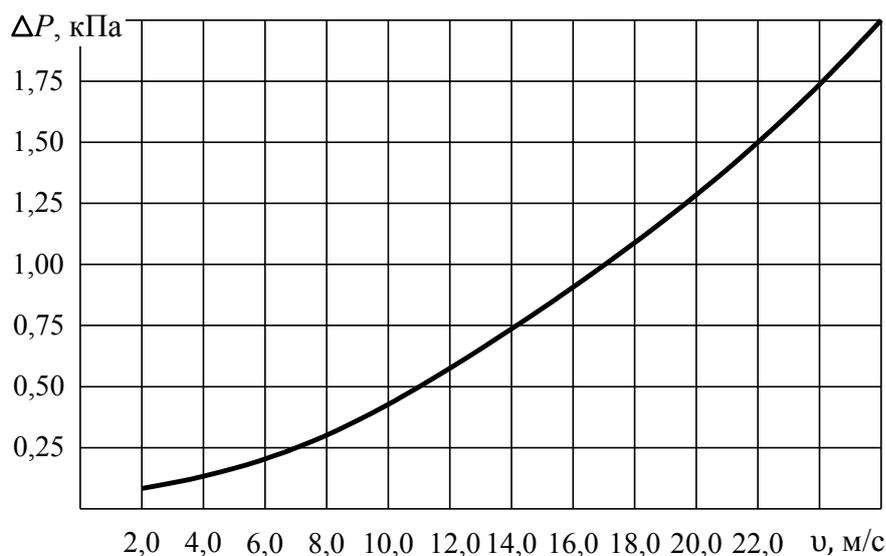
S_c – площадь сетки, m^2 .

Опыт показывает, что для получения устойчивой пены необходимо устанавливать комплект из двух сеток [5] с размером ячейки $a = 0,7 \cdot 10^{-3}$ м. Коэффициент живого сечения сетки в данном случае 0,46, при этом следует, что коэффициент гидравлического сопротивления согласно формуле (14) равен 2,4.

Исходя из этих данных формула (13) примет вид

$$\Delta P = 10,24 + 0,3v^2. \quad (16)$$

Представленная на рис. 4 зависимость, построенная согласно формуле (16), может быть использована при разработке пеногенераторов с принудительной подачей воздуха.

Рис. 4. Функция $\Delta P = f(v)$

Для этого зависимость $\Delta P = f(v)$ необходимо совместить с расходно-напорной характеристикой выбранного вентилятора. В свою очередь, выбор вентилятора зависит от назначения и параметров разрабатываемого пеногенератора с принудительной подачей воздуха.

Вывод. Рассмотренные особенности процесса пенообразования в генераторах с принудительной подачей воздуха позволяют обосновать методический подход к рациональному проектированию пеногенераторов с заданными техническими параметрами.

Список литературы / References

1. Предупреждение и тушение подземных эндогенных пожаров в труднодоступных местах / В.К. Костенко, Ю.Ф. Булгаков, С.В. Подкопаев и др. – Донецк: Ноулидж, 2010. – 349 с.

Kostenko, V.K., Bulgakov, Yu.F., Podkopayev, S.V. etc. (2010). *Preduprezhdeniye i tusheniye podzemnykh endogennykh pozharov v trudnodostupnykh mestakh* [Prevention and fighting the underground fires in the hard-to-reach places]. Donetsk: Knowledge Publ., 349 p.

2. Теплов Г.С. Пенное пожаротушение: история и перспективы // Пожарная безопасность. – 2012. – № 2. – С. 106 – 109.

Теплов, G.S. (2012). *Pennoye pozharotusheniye: istoriya i perspektivy* [Foam fire-fighting: history and prospects]. *Pozharnaya besopasnost*, no. 2, pp. 106 – 109.

3. Технологические схемы профилактики, локализации и тушения эндогенных пожаров в угольных шахтах / В.А. Горбатов, В.Г. Игишев, В.Б. Попов и др. – Кемерово: Кузбассвуиздат, 2002. – 177 с.

Gorbatov, V.A., Igishev, V.G., Popov, V.B. etc. (2002). *Tekhnologicheskiye skhemy profilaktiki, lokalizatsii i tusheniya endogennykh pozharov v ugol'nykh*

shakhtakh [Technological outlines of preventive measures, localization and fighting the spontaneous fires in coal mines]. Kemerovo: Kuzbassvuzizdat Press, 177 p.

4. Игишев В.Г., Син С.А. Современное состояние проблемы борьбы с эндогенными пожарами в шахтах Кузбасса // Уголь. – 2012. – № 7. – С. 36 – 38.

Igishev, V.G., Sin, S.A. (2012). *Sovremennoye sostoyaniye problemy bor'by s endogennymi pozharami v shakhtakh Kuzbassa* [The current state of the problem of fighting the spontaneous fires in the mines of the Kuznetsk Basin]. *Ugol'*, no. 7, pp. 36 – 38.

5. Попов Э.А., Момот Д.И. Экспериментальные исследования процессов получения газомеханической пены на сетках // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 65 – 71.

Popov, E.A., Momot, D.I. (2007). *Ekspperimental'nyye issledovaniya protsessov polucheniya gazomekhanicheskoy peny na setkakh* [Experimental investigations of obtaining the gas/mechanical foam on the nets]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 44, pp. 65 – 71.

6. Пашковский П.С., Попов Э.А., Момот Д.И. Пеногенератор высоконапорный трубный // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2003. – С. 11 – 15.

Pashkovskiy, P.S., Popov, E.A., Momot, D.I. (2003). *Penogenerator vysokonapornyy trubnyy* [High-pressure tube generator]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, pp. 11 – 15.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 08.02.2016

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; 283048, 157, Donetsk. Phone (+38062) 311-69-77

PECULIARITIES OF THE PROCESS OF FOAM-FORMATION IN THE SUPPLIED-AIR GENERATORS

Purpose. Determination of conditions of the stable process of generating the medium or low expansion air-mechanical foam on the nets by the forced air supply.

Methods. Analytical and experimental investigations of the processes of generating the foam on the nets.

Results. The theoretical and experimental investigations carried-out allowed interrelating between the pressure and air-supply velocity, what guarantees the steady mode of the foam-generating on the nets.

Scientific novelty. The peculiarities of formation of the air-mechanical foam on the nets by the forced air supply were disclosed.

Practical value. The methodical approach to the informed choice of ventilating fans to develop the forced air-supply foam generators was proposed.

Keywords: *foam-generating; foam-generating composition; foam generator; forced air supply.*

УДК 331.582:621.311.25

*Павел Викторович Стефаненко, д-р пед. наук, проректор; Донецкий национальный технический университет; директор; Институт гражданской защиты Донбасса; e-mail: spv@igzd.dgtu.donetsk.ua;
Анастасия Юрьевна Артёмова, канд. экон. наук, доц.; Институт гражданской защиты Донбасса; e-mail: bgdicz.artjomova@mail.ru; 283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38062) 337-17-33; 304-59-71*

**РОЛЬ ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА В ОБЕСПЕЧЕНИИ
БЕЗОПАСНОСТИ РАБОТЫ АЭС**

Цель. Определение роли человеческого фактора в обеспечении безопасности работы атомных электростанций на основе современных методик, процедур системного анализа и концептуальных моделей.

Методы. Научные исследования в сфере человеческого фактора представлены характеристиками концептуальной модульной модели SHEL. Для оценки роли человеческого фактора в обеспечении безопасности также использована процедура системного анализа ошибок человека SHARP. Представлено подробное описание методик THERP, HCR, SLIM, DNE,MAPPS.

Результаты. Классифицированы и охарактеризованы ошибки персонала на основании опыта эксплуатации АЭС. Дана характеристика общих шагов для различных методик, имеющихся в процедуре системного анализа ошибок человека: определение, скрининг, разделение, представление, определение взаимовлияния, расчеты, документирование. С точки зрения теоретических научных исследований и практического применения охарактеризованы рекомендации МАГАТЭ по учету человеческого фактора в вероятностных моделях.

Научная новизна. Дан системный анализ характеристик концептуальной модульной модели SHEL, а также процедуры ошибок человека и их анализа SHARP.

Практическая значимость. Определена существенная роль человеческого фактора в возникновении потенциальных угроз при работе АЭС и в обеспечении соответствующей безопасности. Сформулирована сущность «безопасного проекта» в целом как «дружественного оператору» и нацеленного на учет ошибок человека. Выделены пять основополагающих принципов для совершенствования обеспечения безопасности функционирования объекта с учетом роли человеческого фактора.

Ключевые слова: *человеческий фактор; человек-оператор; оператор АЭС; модель поведения человека; безопасность работы; причины ошибок персонала; модульная модель SHEL; система «человек – машина»; процедура системного анализа ошибок человека SHARP.*

Введение. Безопасность работы АЭС напрямую зависит от надежности техники и персонала. Одним из определяющих параметров надежности персонала является безошибочность действий человека, особенно человека-оператора. В ядерной энергетике процент аварий по вине персонала велик. По разным оценкам, прямо или косвенно с ошибками персонала связаны от 15 до 40 % всех аварий и от 20 до 80 % всех нарушений на АЭС, в том числе и самых серьезных. Анализ причин и последствий аварии на АЭС «Три-Майл-Айленд» (Three Mile Island accident), происшедшей 28 марта 1979 г. в США, привел к всестороннему пересмотру подходов к безопасности АЭС и признанию того, что человек является важнейшим звеном в обеспечении безопасности. Тогда же был введен термин «человеческий фактор», также созданы лаборатории, исследующие вероятные ошибки человека-оператора, результатом работы которых явились методики по изучению вероятных ошибок при выполнении различных технологических операций эксплуатации АЭС, в том числе во время ремонта [1]. Детальный анализ причин Чернобыльской катастрофы выявил

глубинные причины аварии, что в конечном итоге привело к возникновению термина «культура безопасности».

Работа оператора АЭС чрезвычайно сложна. Операторы должны не только знать назначение каждого прибора и значение каждого сигнала, но и понимать, какие действия предпринять для обеспечения нормальных условий работы, а также в случае возникновения отклонений в работе оборудования и аварий. Конечно, в их распоряжении имеются соответствующие инструкции для всех режимов работы энергоблока, но объем информации очень большой и очень велика ответственность за выполняемые действия. В этой связи представляют интерес исследования американских коллег о зависимости вероятности ошибки человека-оператора от уровня его подготовки. Вероятность ошибки при выполнении работы за какое-то отведенное время меньше, когда знания в процессе обучения трансформируются в умения и навыки. Эти зависимости являются теоретической базой обучения и тренинга. Разработана, например, модель поведения человека, которая учитывает, что вероятность ошибки зависит от природных способностей человека-оператора и его обучения (HCR – Human Cognitive Reliability – надежность человека как функция его способностей).

Целью исследования является всестороннее изучение роли человеческого фактора в обеспечении безопасности работы АЭС на основе современных методик, процедур системного анализа и концептуальных моделей.

Методы. Для реализации поставленной цели рассмотрим влияние ошибок человека на возможность возникновения аварии на АЭС. В связи с этим охарактеризуем типичные примеры ошибок персонала АЭС на основании опыта эксплуатации и выводы, вытекающие из них.

Пример 1. При срабатывании аварийной защиты оператор должен продублировать ее нажатием кнопки аварийной защиты. Если он не выполняет это действие, чаще всего последствия не наступают, автоматика срабатывает сама. **Вывод 1.** Не каждая ошибка персонала ведет к аварии; некоторые из них почти не сказываются на ходе технологического процесса, поскольку их компенсируют другие события и действия или работник имеет резерв времени, чтобы обнаружить и устранить ранее допущенную им ошибку.

Пример 2. В 2000 г. на втором блоке Ровенской АЭС незакрытая арматура в течение неопределенного времени до события (примерно несколько недель) создала условия для поступления воды из первого контура в бокс парогенератора и снижения уровня в бассейне выдержки и бассейне перегрузки при загрузке свежего топлива. **Вывод 2.** Последствия некоторых ошибок могут проявиться не сразу, а с задержкой от 10 мин до нескольких недель. Такие ошибки приобретают статус ошибок-ловушек, которые кажутся безвредными, но в сочетании с другими обстоятельствами могут привести к авариям.

Пример 3. В 2004 г. на Южно-Украинской АЭС при ремонте воздушной линии электропередач работник ошибочно воздействовал на ключ выбора режимов блочного выключателя, что немедленно привело к аварийному

отключению блока. Вывод 3. Часть ошибок оператора приводит к немедленному наступлению нежелательных последствий, в том числе аварий.

Ошибочные действия персонала можно условно разделить на три категории: 1) случайная ошибка-промах; 2) ошибка по незнанию; 3) сознательно неправильное действие. Чаще всего в ошибках персонала присутствуют элементы разных категорий.

Существует множество других классификаций ошибок персонала, но гораздо более важно знать причины ошибок. Практически все исследователи роли человеческого фактора в атомной энергетике коренными причинами ошибок персонала АЭС называют следующие: неправильную организацию работы и управления (включая надзор, контроль, координацию взаимодействия подразделений); неадекватные процедуры (наличие и качество); ошибочную коммуникацию; некачественную подготовку персонала; личные качества (невнимательность, самонадеянность, несоблюдение процедур и т.п.).

Научные исследования человеческого фактора ведутся в рамках разработки различных концептуальных моделей. Возможность осуществить поэтапный подход к изучению человеческого фактора дает концептуальная модульная модель SHEL [2].

Схематично модель SHEL имеет вид отдельных блоков-модулей, которые отображают разные составляющие эргатической системы, что дает возможность наглядно представить необходимость сопоставления отдельных ее компонентов. SHEL – аббревиатура, которая составлена из начальных букв составных модулей: SOFTWARE (программное обеспечение) – установки (процедуры, символы); HARDWARE (аппаратные средства) – объект (машина); ENVIRONMENT (среда) – среда, в которой должны действовать составные элементы системы; LIVEWARE (персонал) – субъект (человек).

Эта модель была разработана Эдварсом в 1972 г., а позже дополнена иллюстрацией-диаграммой Хоукинса. Она не отображает взаимосвязи между модулями, которые находятся вне границ человеческого фактора (объект – объект, объект – среда, установка – объект) и рассматривается лишь как вспомогательное средство для понимания человеческого фактора.

L – (Liveware) субъект. В центре модели SHEL, по Хоукинсу, находится человек – наиболее весомый и гибкий компонент системы. В условиях производства человек ограничен требованиями должностной инструкции – перечнем функциональных обязанностей, условностями и ограничениями, большинство из которых можно предусмотреть и регламентировать. Границы центрального модуля – модели человека – сложные и аморфные. Другие модули модели должны быть максимально пригнаны к нему для предотвращения нежелательного напряжения и возможных срывов в системе. Для обеспечения такой согласованности необходимо понимание характеристик человека как центрального компонента системы.

L – H – субъект – объект (Liveware – Hardware). Взаимосвязь в системе «человек – машина» легче проследить на конкретных примерах:

проектирование кресел, которые отвечают характеристикам тела; дисплеев, которые отвечают возможностям усвоения информации пользователем; органов управления передачей, кодированием и размещением информации и т.д. Пользователь вообще может не знать о наличии дефектов в системе L-H, даже если это в конечном итоге приведет к катастрофе, поскольку естественная способность человека адаптироваться, приспособливаться маскирует, нивелирует дефекты системы L-H, но не ликвидирует их. Способность к приспособлению несет потенциальную угрозу, о чем должны знать конструкторы техники.

L – S – субъект – установки (Liveware – Software). Речь идет о нефизических аспектах системы, таких, как правила, руководства, контрольные перечни, символы, программное обеспечение и т.д. Виды и программы такой взаимосвязи менее очевидны и соответственно более сложны для решения, например, неадекватность восприятия требований контрольных перечней или символов.

L – E – субъект – среда (Liveware – Environment) В процессе трудовой деятельности одной из первых была установлена взаимосвязь «человек – среда». Поначалу мероприятия, которые рассматривались, были направлены на адаптацию человека к соответствующим условиям окружающей среды (средства индивидуальной защиты). Со временем, с развитием техники, начали проявляться обратные тенденции – приспособление рабочей окружающей среды к возможностям человеческого организма: очищение и кондиционирование воздуха, звукоизоляция, санитарно-гигиеническое нормирование физико-химических факторов окружающей среды. Вся совокупность переменных условий должна учитываться при изучении взаимоотношений в системе L – E. Условия внешней окружающей человека среды стали предметом жесткого политического и экономического внимания.

L – L – субъект – субъект (Liveware – Liveware) Это вид взаимодействия между людьми. Он включает понятие лидерства и подчиненности. Процессам межличностных отношений уделяют большое внимание, так как они являются причиной недоразумений и ошибок, влияют на безопасность и эффективность производства.

Модель SHELL – одна из первых моделей учета человеческого фактора. Дальнейшие исследования [1, 3] создали возможности расчетов вероятности ошибки оператора и включение этих моделей в общую модель сложной системы.

Наиболее фундаментальными научными работами по исследованию «человеческого фактора – Human Factor – HF» являются работы американских ученых Харольда Блэкмана и Дэвида Гартмана, в частности Human reliability and safety analysis data handbook. Важность этих работ состоит в том, что исследователям предоставляется возможность учитывать вероятности выполнения операций по уменьшению последствий аварий в условиях конкретной АЭС, включая действия человека по восстановлению

работоспособности оборудования в качестве базисных событий в вероятностном анализе безопасности.

Обязательным аспектом изучения роли человеческого фактора в обеспечении безопасности является изучение взаимодействия системы «человек – машина». Систематическое изучение факторов, связанных с обслуживанием машины человеком, и взаимодействия системы «человек – машина» необходимо включать в процесс проектирования на ранней стадии разработки проекта и продолжать на протяжении всей работы над проектом. Конструктор должен иметь четкую информацию о тех параметрах, которые отображают текущее состояние всего оборудования и систем, необходимых для выполнения функций безопасности. Подобные положения должны быть разработаны и для дополнительных постов (пультов) управления.

Для управления системой оператору необходима информация, которая бы позволяла: быстро оценивать общее состояние объекта, в котором он находится (или в состоянии нормальной эксплуатации, или в условиях ожидаемого эксплуатационного события, или в аварийном состоянии), и убедиться, что выполняются запрограммированные автоматические действия по обеспечению безопасности, а также определить соответствующие действия, которые должен выполнить оператор.

Для выполнения роли оператора оборудования человеку необходима информация о параметрах отдельных систем объекта и оборудования. Проект должен содействовать успешному выполнению оператором своих действий в пределах имеющегося времени, в условиях предполагаемой (физической) окружающей среды и психологической нагрузки.

Для оценки роли человеческого фактора в обеспечении безопасности также применима процедура системного анализа ошибок человека. Она имеет общие шаги для различных методик: определение, скрининг, разделение, представление, определение взаимовлияния, расчеты, документирование.

Данная процедура известна как SHARP (Systematic Human Action Reliability Procedure). Процедура включает семь шагов и два этапа, на которых принимается решение. Два первых шага выполняют системные аналитики, два последующих – специалисты по анализу человеческого фактора, последние три шага процедуры выполняют совместными усилиями. Объем работ на каждом шаге зависит от типа используемой методики.

Приведем более подробное описание методик [4].

Методика THERP – определение значимости ошибок человека в технике (Technique for Human Error Rate Prediction) – разработана в 1970 г. Данная методика получила широкое распространение как наиболее полная, позволяющая сделать все шаги анализа ошибок человека: выявление, моделирование и количественные оценки ошибок человека. Существует стандарт, регламентирующий применение методики – NUREC/CR-1278, который определяет последовательность действий и условия применения таблиц данных.

Методика HCR – надежность человека как функция его способностей (Human Cognitive Reliability) – использует таксономию по Расмуссену; зависимость надежности человека от времени дается в виде конкретной формулы. Метод часто используется для целей диагностики (прогноза).

Методика SLIM – метод индексов вероятности успеха (Success Likelihood Index Method) – связана с экспертными оценками, учитывает психологические оценки. Основана на способе парных сравнений, когда сравнивают суждения экспертов друг с другом, определяют факторы, важные для конкретной задачи, как они влияют на конечную вероятность ошибки, вес каждого фактора применяется к максимальным и минимальным значениям ошибки. Существует компьютерная версия метода SLIM-MAUD.

Методика DNE – прямые числовые оценки-мнения, экспертные оценки (Direct Numerical estimation). В этом случае вероятности успешных действий человека-оператора определяют эксперты.

Методика MAPPS – метод моделирования ошибок (Maintenance Personnel Performance Simulation) – метод компьютерного моделирования (экспертная система, основанная на наборе правил, которые определяют решения, принимаемые оператором в какой-то ситуации в момент аварии).

С точки зрения теоретических научных исследований и практического применения целесообразны рекомендации МАГАТЭ по учету человеческого фактора в вероятностных моделях. Методика МАГАТЭ рекомендует в вероятностном анализе безопасности приводить начальную информацию о надежности персонала на данной АЭС [5].

Эта информация относится к исходным данным, методам и результатам анализа. Она должна включать в себя: короткое изложение процедур испытаний и технического обслуживания с указанием потенциальных ошибок, связанных с приведением систем и элементов в рабочее состояние по окончании испытаний и технического обслуживания; короткое изложение аварийных процедур, которые относятся к специальным процедурам для конкретных аварийных последовательностей, которые трактуют действия персонала в аварийных условиях; короткое изложение административных процедур; перечень потенциально важных ошибок персонала, включая ошибки приведения систем в рабочее состояние после испытаний и технического обслуживания; описание моделей, методов количественного анализа и оценок верхнего предела вероятностей ошибочных действий для каждой ошибки, включенной в перечень; перечень действий, связанных с событиями отказов, которые можно устранить и которые происходят не по вине персонала (отказ элементов и т.п.) и т.д.

Приведенные требования отвечают методикам, суть которых изложена в данной статье. Справочные данные по учету некоторых факторов, которые влияют на поведение оператора, описаны и в других методиках [4]. Методики, приведенные в учебнике [5], по мнению авторов, являются приоритетными.

Выводы. При работе со сложными системами, имеющими взаимосвязанные подсистемы, которые выдают большие массивы данных, существует высокая вероятность совершения ошибки. Безопасный проект является «дружественным оператору» и нацелен на учет ошибок человека. Для предотвращения ошибок человека или ограничения их последствий используют физические или административные барьеры. На уровне интерфейса пользователя (где существует относительно высокая вероятность совершения ошибки) информацию необходимо представлять оператору таким образом, чтобы обеспечить управляемость и достаточное время для принятия решений и мер. Безопасный проект нацелен также на содействие принятию оператором соответствующих мер с должным учетом имеющегося времени, психологических требований ситуации и физического окружения. Необходимость скорейшего вмешательства оператора должна быть сведена к минимуму. В тех случаях, когда требуется принятие оперативных мер, они должны осуществляться автоматически. Следует учитывать, что работы по проблемам человеческого фактора направлены на решения сугубо практических задач. Концептуальные взаимоотношения этой работы с науками о человеке можно сравнить с отношениями между конструкторской, т.е. прикладной, деятельностью и естественными, теоретическими, науками. Подобно тому, как технические прикладные науки связывают естественные науки с прикладными областями их применения, возрастает количество методологий и методов в области изучения человеческого фактора. Чрезвычайно важно, чтобы все причастные к эксплуатации в пределах эргатических систем осознали, что целиком исключить ошибки человека невозможно.

Проблемы человеческого фактора наиболее основательно разработаны в областях высоких технологий, где возникновение чрезвычайных ситуаций, случаев и инцидентов имеет тяжелые последствия, прежде всего в авиации и атомной энергетике. С 1989 г. Международная организация гражданской авиации регулярно издает «Циркуляр ИКАО. Человеческий фактор». Методология учета человеческого фактора универсальна, что дает возможность применять ее в различных сферах хозяйственной деятельности.

Показательно, что при подходе к проблемам человеческого фактора допускается интуитивный и, в ряде случаев, поверхностный подход. Результатом проявления человеческого фактора стала тяжелейшая в мире техногенная Чернобыльская катастрофа, исследованиями причин которой доказано, что авария обязательно должна была произойти при сложившихся обстоятельствах, так как несовершенными и ошибочными были программа испытаний на 4-м блоке, конструкция РУ, процедуры и подготовка операторов [5]. Но какими бы ни были причины, центральным фактором являются поведение и границы возможностей человека.

Затраты работы, финансов, материалов возросли настолько, что импровизированный или интуитивный подход к решению проблем

человеческого фактора более недопустим. Для существенного уменьшения чрезвычайных ситуаций отношение к проблемам человеческого фактора должно стать более ответственным, человеческий фактор необходимо изучать более глубоко, а накопленные знания применять шире. Распространение информации о человеческом факторе дает наиболее действенную возможность сделать деятельность человека и общества более безопасной и эффективной.

Такими образом, можно говорить о том, что основой постоянных улучшений являются пять основополагающих принципов: 1) даже лучшие специалисты совершают ошибки; 2) ситуации, чреватые ошибками, предсказуемы, управляемы и предотвращаемы; 3) поведение человека определяют организационные процессы и ценности; 4) наивысшая эффективность работы достигается благодаря поощрению и поддержке; 5) нарушений можно избежать, если научиться влиять на причины ошибок.

Список литературы / References

1. Gertman, D.I., Blackman, H.S. (1995). Human reliability and safety analysis data handbook. New York, 448 p.
2. Циркуляр ИКАО. Человеческий фактор. Сборник материалов № 1. Фундаментальные концепции человеческого фактора: утв. Генеральным секретарем и опубликовано с его санкции / Международная организация гражданской авиации. – Монреаль – Канада, 1989. – 33 с.
Tsirkular ICAO. Chelovecheskiy faktor. Sbornik materialov no. 1. Fundamental'nyye kontseptsii chelovecheskogo faktora: utv. General'nyum sekretaryem i opublikovano s yego sanktsii [Human factor. Textbook no. 1. Approved by the General Secretary and published by his approbation] (1989). *Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoy aviatsii* [International Organization Canada of the Civil Aviation]. Canafa, Montreal, 33 p.
3. NUREC/CR-1278. *The THERP methods* (1982). Washington, 123 p.
4. Human reliability assessment training course (1995). USA, INEL, 568 p.
5. Культура безопасности в ядерной энергетике: электронное учебное издание [Текст] / В.В. Бегун, С.В. Широков, С.В. Бегун и др. – Киев, 2012. – 563 с.
Begun, V.V., Shirokov, S.V., Begun, S.V. etc. (2012). *Kul'tura bezopasnosti v yadernoy energetike* [Culture of safety in the nuclear power]. Kiev, 563 p.

Pavel Victorovich Stefanenko, Dr. Sci. (Ped.), Vice-Rector; the Donetsk National Technical University, Director; the Institute of Civil Protection of Donbass; e-mail: spv@igzd.dgtu.donetsk.ua;

Anastasia Yuryevna Artyomova, Cand. Sci. (Econ.), Associate Professor; the Institute of Civil Protection of Donbas; e-mail: bgdicz_artyomova@mail.ru; 283001, Donetsk, 58, Artyem st. Phones (+38062) 337-17-33; 304-59-71

THE ROLE OF THE HUMAN FACTOR IN SAFETY OF THE ATOMIC POWER STATION OPERATION

Purpose. Determination of the role of the human factor in the security of the safety of the atomic power stations operation on the basis of modern methods, procedures of the system analysis and conceptual models.

Methods. The scientific investigations in the sphere of the human factor are introduced as the characteristic of the conceptual modular model SHEL. To estimate the role of the human factor in the security of the safety the procedure of the system analysis of errors of a man SHARP is used, too. The detailed description of the methods THERP, HCR, SLIM, DNE, MAPPS is presented.

Results. The errors of the staff are classified and characterized on the grounds of the operating experience of the atomic power stations. The characteristic of the collective steps for various methods being in the procedure of the system analysis of the errors of the man, i.e. determination, screening, partition, introduction, determination of interaction, calculations, documentation, is given. In terms of the theoretical scientific investigations and practical application the recommendations of the International Atomic Energy Agency (IAEA) on taking into account the human factor in the probabilistic models were characterized.

Scientific novelty. The system analysis of the characteristics of the conceptual modular model SHEL is given, as well one of the procedure of the errors of the man and their analysis SHARP.

Practical value. The essential role of the human factor in origin of the potential threats by the operation of the atomic power station and in the security of the proper safety is determined. The main point of the “safe project” is formulated on the whole as “friendly to an operator” and targeted at taking into account the errors of the man. Five fundamental principles are singled out to improve the security of the functioning of the object taking into account the role of the human factor.

Keywords: *human factor; human-operator; operator of the atomic power station; human behavioral model; safety of operation; causes of errors of the staff; modular model SHEL; “man – machine” system; procedure of the system analysis of the errors of the man SHARP.*

УДК 622.27:504.064.4

Сергей Семёнович Гребёнкин, д-р техн. наук, ведущий науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru; Дмитрий Сергеевич Буряк, науч. сотр.; e-mail: buryak_ds@rambler.ru; Екатерина Николаевна Розанова, инж.; e-mail: katya.rozanova@mal.ru; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-39-70

**ВЛИЯНИЕ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ ЗАКРЫВАЮЩИХСЯ ШАХТ
НА СОСТОЯНИЕ ОБЪЕКТОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Цель. Обобщение и анализ технологических подходов к повышению эффективности мероприятий, уменьшающих влияние породных отвалов закрывающихся шахт на состояние объектов окружающей среды.

Методика. Научное обобщение материалов по проблеме.

Результаты. Обоснованы подходы к разработке научных основ повышения экологической безопасности территорий, где размещены отходы угледобычи.

Практическая значимость. Использование материалов статьи повышает эффективность реализации природоохранных мероприятий.

Ключевые слова: *породный отвал, миграция стоковых вод, природопользование, охрана природы.*

Постановка проблемы. Ежегодно в процессе подземной добычи угля в Донецкой и Луганской областях на поверхность выдавалось около 400 млн м³ породы. За 200-летний период разработки угольных месторождений в Донбассе образовалось около 1000 терриконов, под которыми занято 6300 га плодородных земель, причем площади, отведенные под отвалы, из года в год увеличивались. При существующей технологии на каждую 1000 т добытого угля, как правило, вынимается и размещается на поверхности не менее 1500 м³ вмещающих пород. Вследствие самовозгорания, ветровой и водной эрозии отвалы загрязняют воздушный и водный бассейны, почву, источники водоснабжения, что приводит к значительной антропогенной трансформации природных ландшафтов и ухудшению состояния здоровья населения.

Охрана окружающей среды и обеспечения экологической безопасности угледобывающих предприятий включает широкий комплекс проблем, в том числе инженерно-технические, организационные, государственно-правовые и другие.

Особенно этот вопрос актуален для закрывающихся шахт.

В настоящей статье рассмотрена часть крупной эколого-инженерной проблемы, связанной с влиянием породных отвалов закрывающихся шахт на состояние окружающих объектов среды и прогнозной разработки мероприятий повышения эффективности природоохранной деятельности.

В зависимости от технологии отвалообразования различают конические (терриконы), хребтовые и плоские отвалы. Наибольший вред природному ландшафту наносит отсыпка конических и хребтовых отвалов, высота которых в отдельных случаях достигает 110...120 м.

В стадии закрытия находится более 100 угледобывающих предприятий, на балансе которых 340 породных отвалов, из них 100 относится к категории горящих (табл. 1).

Таблица 1

Распределение породных отвалов ликвидированных шахт
по регионам угледобычи

Угледобывающий регион	Количество закрытых шахт	Породных отвалов	
		всего	горящих
Донецкий	50	170	69
Луганский	30	240	34

При открытом горении породных отвалов в атмосферный воздух попадают оксиды и диоксиды углерода, оксиды азота, серы и других загрязняющих веществ, концентрации которых в десятки раз превышают предельно допустимые нормы.

Сток воды с отвалов приводит к миграции химических продуктов, поэтому состав микроэлементов в поверхностном слое отвала в основном однообразен и включает, главным образом, одни и те же элементы: марганец, медь, цинк, свинец, никель, кобальт. Их количество может существенно отличаться в различных горно-промышленных районах. Особо следует отметить высокую концентрацию соединений марганца и бериллия в поверхностных слоях отвалов Луганской области. Стекающий с породных отвалов слой, фильтруясь через почву, проникает в грунтовые воды, изменяя их химический состав. При этом повышаются концентрации химических компонентов относительно фоновых значений, характерных для природного состава подземных вод.

Ветровая эрозия породных отвалов, кроме загрязнения атмосферы взвешенными частицами, приводит также к загрязнению почвы и водоемов в результате оседания этих частиц.

Результаты исследований. К основным факторам негативного влияния породных отвалов на состояние окружающей среды следует отнести:

- изъятие значительных площадей земель, в том числе плодородных, для размещения отходов;
- загрязнение почв и подземных вод стоками с породных отвалов, которые могут содержать соли кислот и тяжелые металлы;
- загрязнение атмосферного воздуха, поверхностных и подземных вод продуктами горения породных отвалов;

- ухудшение условий проживания населения в угледобывающих регионах;
- повышение частоты заболеваемости населения, проживающего в угледобывающих регионах.

Породные отвалы ликвидируемых шахт содержат в своем составе экологически вредные компоненты – серу, горючие материалы, токсичные продукты горения, тяжелые металлы, радионуклиды и др. Содержание тяжелых металлов в объектах окружающей среды отличается по разным угледобывающим регионам и зависит от концентрации этих веществ в углепородном массиве, а также физико-химических свойств породы, выдаваемой на поверхность. Технология ведения горных работ и работ по отвалообразованию вместе с природно-климатическими условиями оказывает решающее влияние на формирование каменистых почвенно-грунтовых смесей отвалов, которые по своим физико-химическим характеристикам могут заметно отличаться от состава извлекаемых вмещающих горных пород.

Так как шахты относятся к градообразующим промышленным предприятиям, то, несмотря на существующие нормы, за долгие годы их эксплуатационной деятельности не только в зоне санитарной защиты, но и в механической эксплуатационной зоне многих из них оказались хозяйственные и жилые постройки. Поэтому возникает необходимость разработки и внедрения технических мероприятий, позволяющих минимизировать негативное влияние породных отвалов на состояние окружающей среды и здоровье населения.

Массив породного отвала шахты является зоной аэрации, не имеющей по сути аналогов в природе. Горение отвалов, а также физико-химическое поверхностное и глубинное выветривание пород обуславливают постоянство свойств в течение очень длительного промежутка времени. При горении увеличивается сопротивление одноосному сжатию. Процессы выветривания при этом замедляются.

Основным источником поступления влаги в отвал могут быть только атмосферные осадки. После отсыпки отвала восстановительная среда для пород переходит в окислительную.

В формировании техногенного водоносного горизонта в нижней части отвала основную сложность представляет уплотнение пород основания.

При коэффициенте фильтрации подстилающих отвал пород порядка $10^3 \dots 10^4$ м/сут таким же должен быть удельный среднесуточный поток инфильтрации.

К достаточно обоснованным доказательствам наличия в нижней части того или иного отвала водоносного горизонта являются оползни откосов. Следует отметить, что вопросы формирования техногенного водоносного горизонта в отвалах достаточно сложны.

Натурные исследования породных отвалов показали, что их устойчивость во многих случаях не обеспечена. При этом критической высоты нет.

Оползневые деформации откосов наблюдаются в достаточно широком диапазоне высот.

По своей сути механизм любого оползня является гипотезой, учитывающей максимальное количество факторов деформации.

Оползни отвалов сложные, сочетающие вариант деформации неослабленного откоса с пластическим выдавливанием слоя пород в нижней части.

В общем виде механизм оползней откосов представляется следующим.

После достижения отвалом критической высоты нижний слой, при наличии повышенной увлажненности, переходит из трехфазного в двухфазное состояние с формированием значительного бокового распираия. Углы внутреннего трения при этом уменьшаются до минимальных.

Анализ показывает, что среди методов расчетов устойчивости отсутствуют методы, отражающие особенности механизма оползней данного типа. В связи с этим рекомендован новый метод, разработанный с учетом нормативных требований [1].

В расчетной схеме, приведенной на рис. 1, предельное равновесие устанавливается при учете наличия в основании слабого слоя и силы P бокового распираия при достижении отвалом критической высоты.

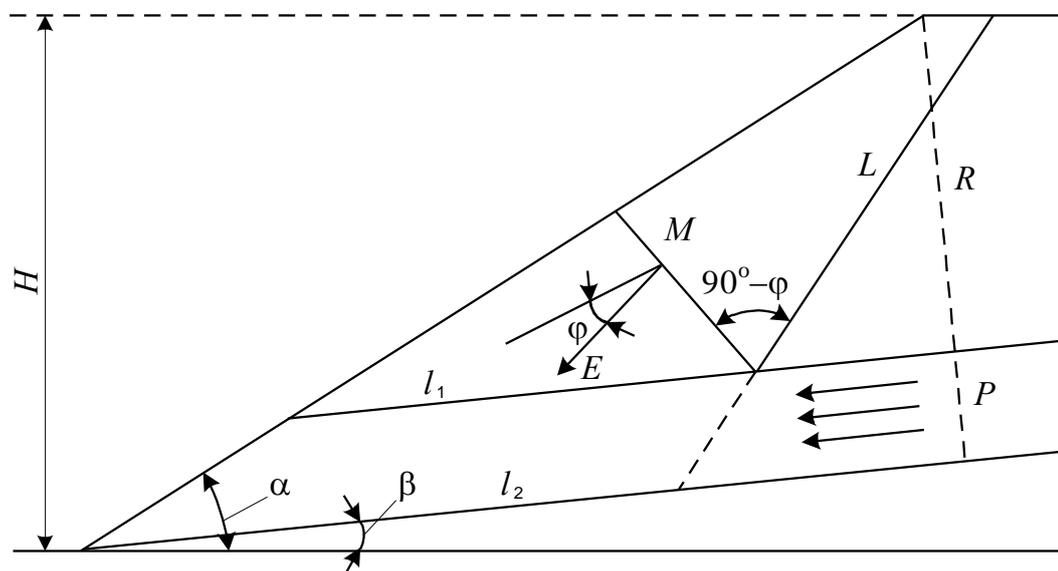


Рис. 1. Схема расчета устойчивости отвалов

При положительных и отрицательных значениях углов наклона основания β коэффициент запаса устойчивости определяется из выражения

$$\eta = \frac{\left[E \sin \left(45 + \frac{\varphi}{2} - \beta \right) + \gamma S_2 \cos \beta \right] \operatorname{tg} \varphi_k + \rho_k (l_1 - l_2)}{E \sin \left(45 - \frac{\varphi}{2} - \beta \right) - \gamma S_2 \cos \beta + PK_p}; \quad (1)$$

где η – коэффициент запаса устойчивости;

$$E = gS_1 \sin \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) - \gamma S_2 \cos \left(45 + \frac{\varphi}{2} \right) \operatorname{tg} \varphi - \rho(L + M);$$

γ – плотность пород, т/м³;

φ, φ_k – угол внутреннего трения верхней и нижней части отвала соответственно, ...°;

ρ, ρ_k – удельное сцепление (верхней и нижней части отвала), т/м³;

S_1, S_2 – площадь призмы активного давления и призмы упора, включая слабый слой, м²;

$$P = \gamma(R + 0,5h)h - \text{боковое распирание, т/м}^2;$$

K_p – коэффициент бокового распирания;

$\beta, \rho, L, M, l_1, l_2, K$ – определяют из рис.1.

Один из наиболее сложно определяемых – коэффициент бокового распирания. Для условий зернистой среды этот коэффициент может варьироваться от 0 до 0,41. При переходе слоя полностью в вязкопластическое состояние K_p может достигать 1.

Отсыпка отвалов сопровождается заметной осадкой поверхности непосредственно под отвалом и на близлежащей к отвалу площади независимо от того, расположен отвал на целике или на подработанной территории. Осадка в каждом случае определяется геологическими условиями основания и высотой отвала. Расположение отвалов в чашеобразных понижениях способствует накоплению в течение определённых промежутков времени дренируемых четвертичных, поверхностных и инфильтрационных с отвала вод, которые в последующем начинают разгружаться в подземные горизонты и в открытые водотоки.

Отметим, что в отвальных породах содержится ряд токсичных макро- и микроэлементов, которые следует отнести к потенциально опасным при наличии длительной, хотя и незначительной ветровой эрозии.

Особенно опасны зафиксированные в отвальных породах бериллий, свинец, цинк, кадмий, фосфор, ртуть, мышьяк (I класс опасности по токсичности), а также селен, стронций, барий, бор, никель, марганец, железо, молибден, хром, которые в условиях региона являются высокорастворимыми, в значительной мере переходят в подвижные формы и образуют основную часть

в суммарном загрязнении грунтов, подземных и поверхностных вод, биологической среды.

Непосредственно возле ряда шахтных отвалов зафиксированы максимальные валовые концентрации кобальта, никеля, молибдена, ванадия, бария и свинца. Максимальные валовые концентрации мышьяка, цинка, кадмия, ртути, фосфора, хрома и сурьмы распространены на расстоянии 1...3 км от отвалов. При этом местами максимальные валовые концентрации ванадия и никеля превышают ПДК в 2 раза; меди, хрома и марганца – в 3,2-3,5 раза; мышьяка, свинца и цинка – в 7 раз; а кобальта и молибдена – в 10 раз [2, 3].

В связи с отсутствием режимных наблюдений за миграцией токсичных компонентов в глубину массивов покровных пород, предварительную оценку можно выполнить по зависимости, предложенной Биндеманом [4]:

$$t = \frac{h\mu}{\sqrt[3]{\left(\frac{Q}{F}\right)^2 K}}, \quad (2)$$

где t – время, сут;

h – мощность слоя, м;

μ – недостаток (дефицит) влажности пород;

K – коэффициент фильтрации пород, м/сут;

$\frac{Q}{F}$ – удельное атмосферное увлажнение, м/сут.

Коэффициент фильтрации в зоне аэрации зависит от степени влагонасыщения:

$$K = K_0 Y^{3,5}, \quad (3)$$

где K_0 и K – соответственно коэффициенты фильтрации при полном влагонасыщении и фактический в зоне аэрации, м/сут;

Y – степень влагонасыщения.

Результаты выполненных исследований наиболее полно и целесообразно представить следующими выводами.

Выводы. Для решения проблемы обращения с отходами ликвидированных угледобывающих предприятий рекомендуются следующие мероприятия:

- разработка научных основ повышения экологической безопасности территорий, где размещены отходы угледобычи;

- усовершенствование методов оценки класса опасности отходов угледобычи, что позволит оценить реальную экологическую опасность породных отвалов и их компонентов для объектов окружающей среды и биоты;

- прогнозирование изменений качества объектов окружающей среды на территориях размещения породных отвалов;
- повышение ставок экологического налога за размещение в окружающей среде отходов горно-добывающей промышленности;
- разработка и внедрение мероприятий, направленных на предотвращение трансформации естественных ландшафтов и загрязнения земной поверхности нетвердыми отходами добычи и переработки угля;
- усовершенствование технологий добычи и обогащения угля, позволяющих снизить объемы образования отходов.

Внедрение предложенных мероприятий позволит привести территории размещения отходов в соответствие с требованиями природоохранного законодательства и расширить возможности использования отходов угледобычи.

Список литературы / References

1. Методические указания по определению углов наклона бортов, откосов, уступов и отвалов эксплуатируемых карьеров. – Л.: ВНИМИ, 1972. – 93 с.

Metodicheskiye ukazaniya po opredeleniyu uglov naklona bortov, otkosov, ustupov i otvalov ekspluatiruyemykh kar'yerov [Methodical guidance on determination of the inclination angles of sides, slopes, ledges and dumps of the open pits being exploited] (1972). Leningrad: VNIMI, 93 p.

2. Технологии обеспечения экологической и техногенной безопасности горно-добывающих регионов при ликвидации угледобывающих предприятий Украины: монография / В.И. Бузило, С.С. Гребёнкин, В.Н. Ермаков, В.Н. Павлыш, В.Д. Рябичев, А.В. Павличенко; под общ. ред. В.И. Бузило и С.С. Гребёнкина. – Днепропетровск: Литограф, 2013. – 348 с.

Buzilo, V.I. (ed.), Grebyenkin, S.S. (ed.), Yermakov, V.N., Pavlysh, V.N., Ryabichev, V.D., Pavlichenko, A.V. *Tekhnologii obespecheniya ekologicheskoy i tekhnogennoy bezopasnosti gornodobyvayushchikh regionov pri likvidatsii ugledobyvayushchikh predpriyatiy Ukrainy. Monografiya* [Technologies of guarantee of the ecological and anthropogenic safety of mining regions by closing down the coal producers. Monograph]. Dnepropetrovsk: Lithograph Publ., 348 p.

3. Технологии повышения эффективности подземной добычи угля в сложных горно-механических условиях, вызванных массовой ликвидацией угольных шахт: монография / В.И. Бузило, В.Д. Рябичев, С.С. Гребёнкин, А.В. Павличенко; под общ. ред. В.Д. Рябичев. – Днепропетровск: Литограф, 2014. – 188 с.

Buzilo, V.I., Ryabichev, V.D. (ed.), Grebyenkin, S.S., Pavlichenko, A.V. (2013). *Tekhnologii povysheniya effektivnosti podzemnoy dobychi uglya v slozhnykh gorno-mekhanicheskikh usloviyakh, vyzvannykh massovoy likvidatsiyey ugol' nykh shakht: Monografiya* [Technologies of the efficiency upgrading of the deep mining

under difficult mining and mechanical conditions caused by the mass closing down of the coal mines. Monograph]. Dnepropetrovsk: Lithograph Publ., 188 p.

4. Оценка изменений гидрогеологических условий под влиянием производственной деятельности. – М.: Недра, 1978. – 206 с.

Otsenka izmeneniy gidrogeologicheskikh usloviy pod vliyaniyem proizvodstvennoy deyatel'nosti [Estimation of the changes of hydrogeological conditions under the influence of production activities] (1978). Moscow: Nedra Publ., 206 p.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 25.01.2016*

Sergey Semyenovich Grebyenkin, Dr. Sci. (Tech.), leading scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru; Dmitriy Sergeyevich Buryak, scientific associate; e-mail: buryak_ds@rambler.ru; Yekaterina Nikolayevna Rozanova, engineer; e-mail: katya.rozanova@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. (+38062) 311-39-70

INFLUENCE OF THE WASTE DUMPS OF THE MINES BEING CLOSED DOWN ON THE STATE OF ENVIRONMENTAL OBJECTS

Purpose. Generalization and analysis of engineering-technological approaches to increase of the efficiency of the actions reducing the influence of the mines being closed down on the state of the environmental objects.

Methods. Scientific generalization of materials on the problem.

Results. The approaches to the working-out of the scientific bases of increase of the ecological safety of the territories where the waste products of coal mining are placed are substantiated.

Practical value. The use of the materials of the article increases the efficiency of realization of the environmental measures.

Keywords: *rock dump; wastewater migration; nature management; nature protection.*

УДК 622.822.22:622.693.26

Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, ведущий инж.; e-mail: zinstar@mail.ru; *Олег Петрович Пашковский*, ст. науч. сотр.; e-mail: kingston-4@mail.ru; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-13-52

ФИЛЬТРАЦИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ УГОЛЬНО-ПОРОДНЫЕ СКОПЛЕНИЯ НА ОТВАЛАХ

Цель. Прогноз утечек воздуха через скопления породы и угля на отвалах для дальнейших расчётов концентраций вредных веществ.

Результаты. Рассмотрены процессы фильтрации воздуха через угольно-породные скопления на отвалах.

Научная новизна. Предложена математическая модель фильтрации воздуха в зависимости от наклона отвала при ламинарном, турбулентном и промежуточном режимах движения.

Выводы. Получены аналитические зависимости скорости фильтрации для дальнейшей оценки концентраций вредных веществ.

Ключевые слова: породный отвал; фильтрация воздуха; горение; аналитическая зависимость; вредные вещества; концентрации; температура.

Постановка проблемы. Горение породных отвалов отрицательно сказывается на экологической безопасности городов и посёлков. Несмотря на наличие методик расчёта концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ и наличие современных способов определения поля температур тепловизорами [1], требуется глубокое изучение протекающих на породных отвалах тепломассообменных процессов с целью аналитического прогноза выделений вредных веществ между натурными наблюдениями и разработка мероприятий по уменьшению выделения вредных веществ в атмосферу [2 – 5].

Цель исследований. Прогноз утечек воздуха через скопления породы и угля на отвалах для дальнейших расчётов концентраций вредных веществ.

Материалы исследований. Представим горящий породный отвал как отдельные очаги пожара на его поверхности (рис. 1), где в достаточном количестве для горения содержатся уголь и куски породы, пространство между которыми заполнено газом, состоящим из вредных веществ и воздуха.

Под действием напора ветра и тепловой депрессии воздух проникает в пустоты и трещины горизонтально, теряет кинетическую энергию и затем вертикально через очаг пожара выходит, как показано на рис. 1, в атмосферу.

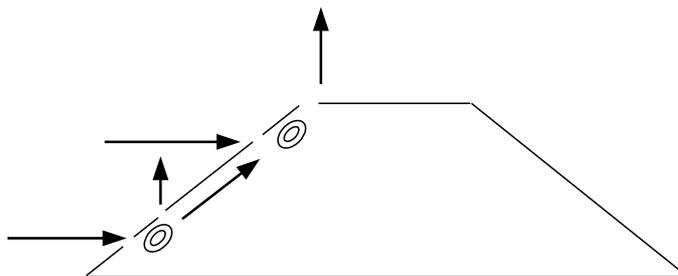


Рис. 1. Схема хребтовидного или плоского отвала с очагами горения (горизонтальными стрелками указано направление ветра, вертикальными стрелками – истечение нагретых газов, наклонной – направление фильтрации воздуха)

Для аналитического описания утечек воздуха через угольно-породное скопление используем так называемый двучленный закон сопротивления, учтя при этом тепловую депрессию:

$$\nabla P = -\frac{\eta}{k_{\phi}} \vec{v} - \frac{\delta \rho v}{\sqrt{k_{\phi}}} \vec{v} - (\rho - \rho_0) \vec{g}, \quad (1)$$

где ∇P – градиент давления, Па/м;

η – динамическая вязкость воздуха, кг/(м·с);

k_{ϕ} – коэффициент проницаемости дисперсной среды, м²;

\vec{v} – вектор скорости фильтрации, м/с;

δ – эмпирическая константа турбулентности фильтрационного потока в пористой среде;

ρ – плотность воздуха в зоне горения, кг/м³;

ρ_0 – плотность воздуха, поступающего в угольное скопление, кг/м³;

\vec{g} – вектор ускорения свободного падения, м/с².

Так как плотность воздуха обратно пропорциональна температуре, а динамическая его вязкость пропорциональна кинематической вязкости:

$$\rho = \frac{T_0}{T} \rho_0; \quad \eta = \rho \nu, \quad (2)$$

то векторное уравнение (1) примет вид

$$\nabla P = - \left(\frac{\nu}{k_{\phi}} + \frac{\delta \nu}{\sqrt{k_{\phi}}} \right) \rho \vec{v} + \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \rho_0 \vec{g}, \quad (3)$$

где T – температура фильтрационного потока над очагом пожара, К;
 T_0 – температура атмосферного воздуха, К;
 ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с.

В проекции на направление фильтрационного потока (см. рис.1) уравнение (3) примет вид

$$\frac{dP}{dx} = - \left(\frac{\nu}{k_\phi} + \frac{\delta \nu}{\sqrt{k_\phi}} \right) \rho \nu + \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \rho_0 g \sin \alpha, \quad (4)$$

где α – угол склона породного отвала, ...°;

x – текущее расстояние, отсчитываемое от места расположения очага горения, м.

Поскольку скорость воздуха в стационарном режиме – величина постоянная: $\rho \nu = \rho_0 \nu_0$, то уравнение (4) с учётом первого равенства (2) примет вид

$$\frac{dP}{dx} = - \left(\frac{\nu}{k_\phi} + \frac{\delta \nu_0}{\sqrt{k_\phi}} \frac{T}{T_0} \right) \rho_0 \nu_0 + \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \rho_0 g \sin \alpha. \quad (5)$$

Интегрируя уравнение (5) по x , получим

$$\frac{P_0 - P_1}{l} = \left(\frac{\nu}{k_\phi} + \frac{\delta \nu_0}{\sqrt{k_\phi}} \frac{T_c}{T_0} \right) \rho_0 \nu_0 - \left(1 - \frac{T_0}{T_{cr}} \right) \rho_0 g \sin \alpha, \quad (6)$$

где P_0 – полное атмосферное давление при скорости ветра, равной нулю, Па;

P_1 – атмосферное давление при скорости ветра, отличной от нуля, Па;

l – длина зоны фильтрации или расстояние от места расположения очага горения до вершины породного отвала, м.

Вошедшие в решение параметры T_c и T_{cr} означают соответственно среднеинтегральную и среднегармоническую температуры фильтрационного потока:

$$T_c = \frac{1}{l} \int_0^l \frac{T}{T_0} dx; \quad T_{cr} = \int_0^l \frac{T_0}{T} dx.$$

Разность давлений или депрессия, создаваемая напором ветра, может быть определена как динамическая составляющая давления в проекции на перпендикуляр к плоскости откоса и равна

$$P_0 - P_1 = \frac{1}{2} \rho_0 u_0^2 \sin \alpha, \quad (7)$$

где u_0 – скорость ветра, м/с.

Подставляя выражение (7) в решение (6), получим

$$\frac{\rho_0 u_0^2 \sin \alpha_1}{2l} = \left(\frac{v}{k_\phi} + \frac{\delta u_0}{\sqrt{k_\phi}} \frac{T_c}{T_0} \right) \rho_0 u_0 - \left(1 - \frac{T_0}{T_{cr}} \right) \rho_0 g \sin \alpha. \quad (8)$$

Из решения (8) следует (левая часть равенства), что чем больше угол склона и чем ближе к вершине отвала находится очаг горения, тем большее влияние на него оказывает сила ветра. Входящий в уравнение (8) коэффициент k_ϕ , м², проницаемости дисперсной среды (пород) может быть определён по формуле [5]

$$k_\phi = \frac{d_{y-\Pi}^2}{180(1/\varepsilon - 1)^2}, \quad (9)$$

где ε – средний коэффициент порозности кусков пород и угля;

$d_{y-\Pi}$ – среднегармонический диаметр кусков породы и угля, м.

Среднегармонический диаметр пород и угля может быть определён по формуле

$$d_{y-\Pi} = \frac{1}{n/d_y + (1-n)d_\Pi},$$

где n – объёмная доля угля в породах;

d_y – среднегармонический диаметр частиц угля, м;

d_Π – среднегармонический диаметр кусков породы, м.

Из формулы (9) видно, какое существенное влияние может оказывать фракционный состав пород и угля, а также пустотность между ними на скорость фильтрации воздуха через угольно-породное скопление.

Для оценки влияния турбулентности на режим фильтрации через угольно-породное скопление представим уравнение (8) в виде

$$\bar{h} = \frac{d_{y-n}}{(1/\varepsilon - 1)^2 \rho_0 v_0^2 l} \left[\frac{\rho_0 u_0^2 \sin \alpha}{2l} + \left(1 - \frac{T_0}{T_{cr}} \right) \rho_0 g \sin \alpha \right] = \delta' + \frac{180v}{v_0 d_{y-n}}, \quad (10)$$

где $\delta' = \frac{\sqrt{180}}{(1/\varepsilon - 1) T_0} T_c \delta$ – обобщенная константа турбулентности.

На рис. 2 представлена зависимость (10) режима фильтрации потока воздуха от числа Рейнольдса $Re = v_0 d_{y-n} / \nu$ в диапазоне его чисел от 2 до 20.

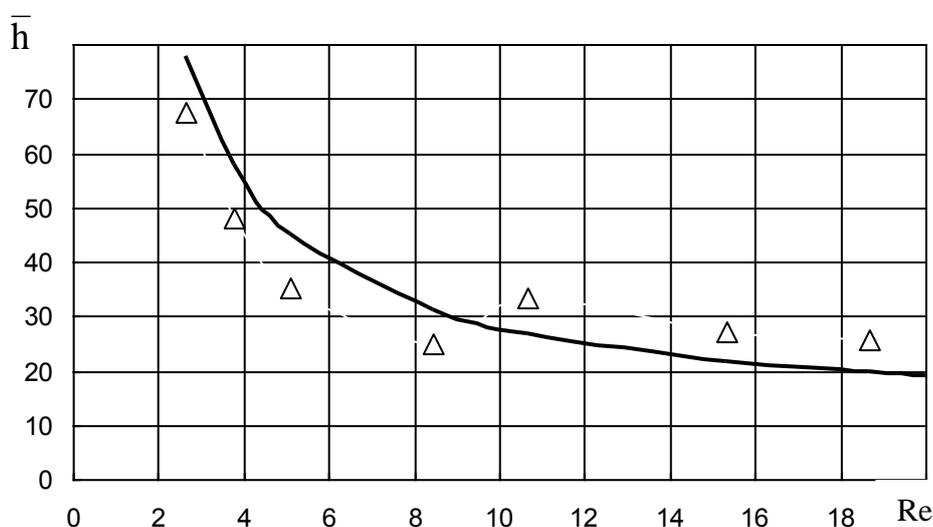


Рис. 2. Зависимость режима фильтрации воздуха от числа Рейнольдса:

Δ – результаты экспериментальных исследований;

— — результаты аналитических исследований

Найдена эмпирическая константа $\beta = 0,93$ при коэффициенте порозности угольно-породного скопления в экспериментах, равном $\varepsilon = 0,45$.

Решая решение (8) относительно скорости фильтрации, получим

$$v_0 = \frac{2b}{(1 + \sqrt{1 + 4b/a})}. \quad (11)$$

Входящие в формулу (11) коэффициенты, м/с, равны

$$a = \frac{v}{\delta \sqrt{k_\phi}} \frac{T_0}{T_c}; \quad b = \frac{k_\phi \left[\rho_0 u_0^2 \sin \alpha / (2l) + (1 - T_0 / T_{cr}) \rho_0 g \sin \alpha \right]}{\rho_0 v}. \quad (12)$$

Анализ формулы (11) показывает, что при $a \gg 4b$ осуществляется ламинарный режим движения со скоростью $v_0 = b$, а при $b \gg a/4$ осуществляется турбулентный режим. Используя формулы (9), (11) и (12), можно определить фильтрационную скорость воздуха, проходящего через очаг пожара. Так, полагая средний коэффициент порозности пород и угля $\varepsilon = 0,45$; среднегармонический диаметр кусков породы и угля $d_{y-п} = 0,02$ м, найдём коэффициент их проницаемости по формуле (7), равным $k_{\phi} = 1,49 \cdot 10^{-6}$. Затем, принимая плотность воздуха $\rho_0 = 1,2$ кг/м³; его кинематическую вязкость $\nu = 1,5$ м²/с; угол откоса породного отвала $\alpha = 45^\circ$; скорость ветра $u_0 = 10$ м/с; температуру атмосферного воздуха $T_0 = 300$ К; среднюю температуру фильтрационного потока по глубине залегания очага горения $T = 1273$ К; глубину залегания очага $H = 2$ м; ускорение свободного падения $g = 9,81$ м/с²; эмпирическую константу турбулентности фильтрационного потока $\delta = 0,93$, определим по формулам (10) коэффициенты $a = 0,0031$ м/с и $b = 2,5$ м/с. Зная коэффициенты уравнения (9), находим из него скорость турбулентной фильтрации $v_0 = 0,086$ м/с. Сравнивая найденную скорость фильтрации с ламинарной $v_0 = b = 2,5$ м/с, убеждаемся, насколько существенен вклад турбулентности в режим течения воздуха.

Вывод. Полученные аналитические зависимости скорости фильтрации воздуха через угольно-породные скопления на отвалах позволяют определить режим фильтрации (ламинарный, турбулентный или промежуточный) и скорость фильтрации воздуха. По скорости фильтрации можно судить о температуре и интенсивности выделения вредных веществ из породных отвалов.

Список литературы / References

1. Определение границ очагов тепловыделений на породных отвалах / Э.А. Попов, В.П. Засевский, Д.И. Момот, М.А. Яремчук // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 1998. – С. 93 – 96.

Popov, E.A., Zasevskiy, V.P., Momot, D.I., Yaremchuk, M.A. (1998). *Opredeleniye granits ochagov teplovydeleniy na porodnykh otvalakh* [Determination of the borders of the heat emission fireplaces on the rock dumps]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, pp. 93 – 96.

2. Зборщик М.П., Осокин В.В. Предотвращение экологически вредных проявлений в породах угольных месторождений // Донецк: ДонГТУ, 1996. – 178 с.

Zborshchik, M.P., Osokin, V.V. (1996). *Predotvrashcheniye ekologicheskikh vrednykh proyavleniy v porodakh ugol'nykh mestorozhdeniy* [Prevention of the ecologically harmful signs in the rocks of the coal-fields]. Donetsk: DonGTU Press, 178 p.

3. Зборщик М.П., Осокин В.В. Предотвращение самовозгорания горных пород. – Киев: Техника, 1990. – 176 с.

Zborshchik, M.P., Osokin, V.V. (1990). *Predotvrashcheniye samovozgoraniya gornykh porod* [Prevention of spontaneous combustion of the mine rocks]. Kiev: Tekhnika Publ., 176 p.

4. Зборщик М.П., Осокин В.В., Паниотов Ю.Н. Условия самонагревания пиритсодержащих осадочных горных пород // Изв. вузов. Горный журн. – 1990. – №11. – С. 9 – 11.

Zborshchik, M.P., Osokin, V.V., Paniotov, Yu.N. (1990). *Usloviya samonagrevaniya pirtsoderzhashchikh osadochnykh gornykh porod* [Conditions of the spontaneous heating of the sedimentary mine rocks containing pyrite]. *Izv. vuzov. Gornyy zhurnal*, no. 11, pp. 9 – 11.

5. Зборщик М.П., Осокин В.В., Паниотов Ю.Н. Условия теплового взрыва в пиритсодержащих горных породах // Разраб. месторождений полез. ископаемых: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – 1990. – Вып. 86. – С. 70 – 77.

Zborshchik, M.P., Osokin, V.V., Paniotov, Yu.N. (1990). *Usloviya teplovogo vzryva v pirtsoderzhashchikh gornykh porodakh* [Conditions of the thermal explosion in the mine rocks containing pyrite]. *Razrab. mestorozhdeniy polez. iskopayemykh: Resp. mezhved. nauch.-tekhn. sb.* [Mining exploitation: the Republic interdepartmental scientific-technical collection], issue 86, pp. 70 – 77.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 27.01.2016

Igor Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech.), leading engineer; e-mail: zinstar@mail.ru; *Oleg Petrovich Pashkovskiy*, senior scientific associate; e-mail: kingston-4@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 (+38062) 311-13-52

AIR FILTRATION THROUGH COAL-AND-ROCK ACCUMULATIONS ON DUMPS

Purpose. The forecast of air leaks through the rock and coal accumulations on the dumps for further calculations of concentrations of harmful substances.

Results. The processes of air filtration through the coal-and-rock accumulations on the dumps were considered.

Scientific novelty. The mathematical model of air filtration depending on the inclination of the dump by the laminar, turbulent and intermediate movement modes was proposed.

Conclusions. The analytical dependences of the filtration rate for the further estimation of the concentrations of the harmful substances were received.

Keywords: *mining rock dump; air filtration; combustion; analytical dependence; harmful substances; concentrations; temperature.*

УДК 614.8”363”:654.9

Александр Николаевич Слабченко, нач. отд.; e-mail: aleks-2591@yandex.ua; Батыр Джунисбаевич Инкарбаев, ст. науч. сотр.; e-mail: in.boris@list.ru; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-39-62

СИСТЕМА СВЯЗИ И ОПОВЕЩЕНИЯ КАК СРЕДСТВО ЗАЩИТЫ НАСЕЛЕНИЯ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ

Цель. Определение путей и способов модернизации существующей системы связи и оповещения населения в чрезвычайных ситуациях.

Методы. Информационные исследования системы связи и оповещения населения в чрезвычайных ситуациях.

Результаты. Предложены пути модернизации системы связи и оповещения населения в чрезвычайных ситуациях.

Научная новизна. Экспериментальные оценки и анализ существующих систем связи и оповещения населения в чрезвычайных ситуациях для их модернизации.

Практическая значимость. Сокращение времени оповещения населения. Улучшение системы связи и оповещения населения в чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: система связи; сирена; радиовещание; светодиодные экраны; оповещение населения; чрезвычайная ситуация.

Постановка вопроса. Оповещение населения – экстренное доведение до населения сигналов оповещения и оперативной информации о мероприятиях гражданской обороны, которые проводят с целью подготовки их к действиям в условиях мирного или военного времени, недопущения при этом паники и беспорядков, обеспечения эвакуационных мероприятий.

Оповещают население централизованно на всей территории, подвергающейся опасности, в соответствии с единым порядком передачи сигналов или речевой информации оповещения. Оповещение о начале эвакуации населения организуют в установленном порядке руководители промышленных объектов.

Единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, утвержденная постановлением Совета Министров Донецкой Народной Республики от 09.04.2015 № 5-11, решает вопросы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного, техногенного и иного характера с помощью комплекса мероприятий, обеспечивающих в мирное время защиту населения, территорий и окружающей среды, материальных и культурных ценностей Донецкой Народной Республики. Она объединяет органы управления, силы и средства органов исполнительной власти, органов местного самоуправления, организаций, в полномочия которых входит решение вопросов защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Анализ состояния систем оповещения населения в чрезвычайных ситуациях содержится в работе [1]. Настоящее исследование необходимо для определения путей модернизации этих систем.

Состояние вопроса. При проведении оповещения задействуют:
сеть электросиренного оповещения;
городскую радиотрансляционную сеть;
сеть уличных громкоговорителей;
сеть радиовещания;
сеть кабельного телевидения.

Основным способом оповещения и информирования населения о возникновении (угрозе возникновения) чрезвычайных ситуациях мирного и военного времени является передача кратких информационных сообщений и сигналов оповещения для распространения посредством телевизионного и радиовещания. Передача сигналов оповещения и кратких информационных сообщений осуществляется всеми средствами связи и вещания вне всякой очереди.

На рис. 1 приведена схема системы оповещения, на которой представлены технические средства оповещения.

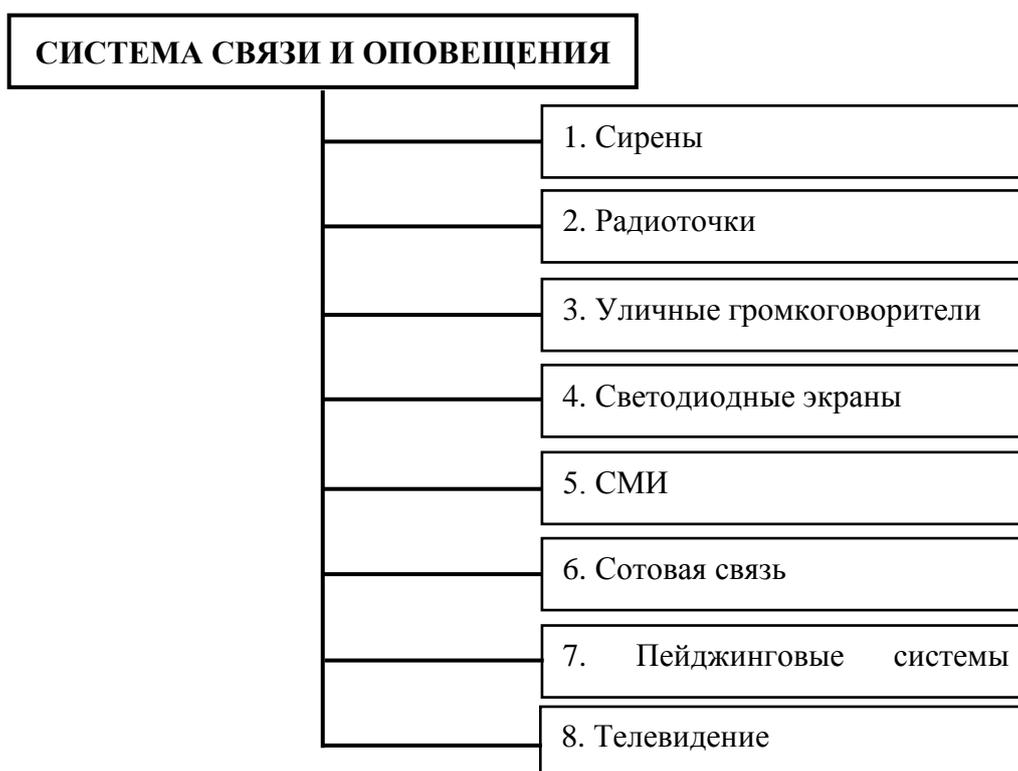


Рис. 1. Системы связи и оповещения

Сирены. Сирены устанавливают на высотных домах, площадях, в местах скопления людей. Сирены можно задействовать по всему городу сразу и по отдельным зонам, если чрезвычайная ситуация имеет локальный характер. Сирена выдаёт сигнал «Внимание всем» – такой характерный завывающий, неприятный звук (см. таблицу).

Количество сирен в Донецкой Народной Республике

Город	Площадь, км ²	Кол-во сирен	Кол-во сирен на 10 тыс. чел.
Донецк	358	62	0,65
Горловка	207	23	0,92
Амвросиевка	19,4	1	0,52
Дебальцево	24,2	2	1,33
Енакиево	39,4	14	1,75
Кировское	7	0	0
Макеевка	425,7	5	0,14
Новоазовск	7,1	2	1,1
Снежное	87,2	4	
Старобешево	1,282	1	0,81
Тельманово	1,340	0	0
Торез	44,37	3	0,55
Харцызск	19,3	11	1,93
Шахтерск	42,22	0	0
Ясиноватая	26,6	5	1,3

В Донецкой Народной Республике установлено 133 сирены (численность населения 2,3 млн чел., 1 электросирена на 17293 чел.).

Задействованные сирены круглосуточно эксплуатируют от 20 до 25 лет (а некоторые – до 35 лет) и они выработали свой ресурс.

Радиоточки. Радиоточка – средство оповещения, которое работает в условиях отключения электроэнергии и обеспечивает доведение информации непосредственно в зонах, прилегающих к очагу природной или техногенной катастрофы.

По нормам они должны быть установлены на каждом объекте, который сдают в эксплуатацию. Хотя в некоторых домах их демонтируют сами жители – запретить этого, к сожалению, никто не может.

В Донецкой Народной Республике проводное радиовещание состоит из 26 678 радиоточек и 86 радиоузлов (рис. 2) на 01.07.2015.

Уличные громкоговорители. Громкоговорители уличного исполнения предназначены для систем оповещения и трансляции сообщений и музыкальных программ на улице. Они стоят на центральных магистралях, рядом с торговыми центрами, в спальнях районах. В ДНР установлено 100 уличных громкоговорителей, из них 40 – в Донецке, 58 – в Макеевке и по одному в Енакиево и Тельманово.

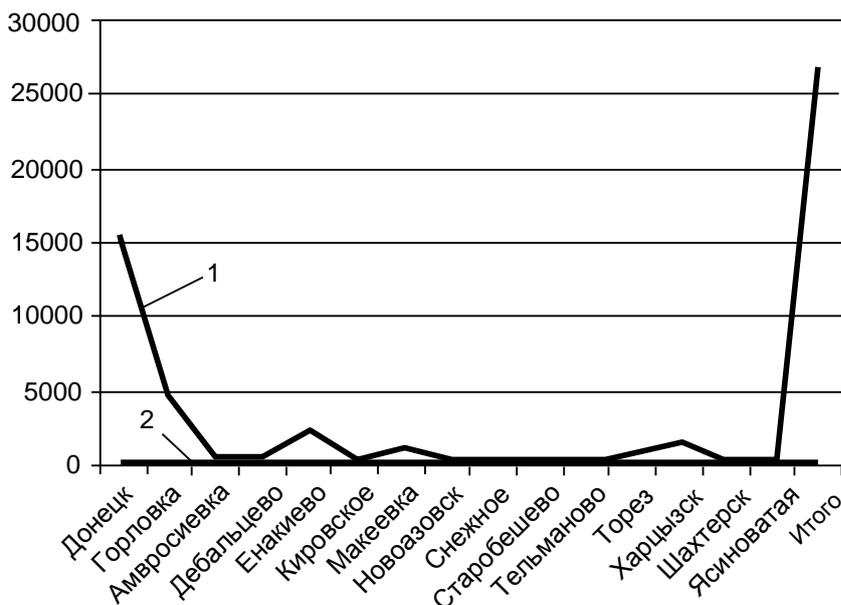


Рис. 2. Сведения о радиотрансляционной сети:
1 – количество радиоточек; 2 – количество радиоузлов

Светодиодные экраны. Это нововведение последних лет. Современные города уже невозможно представить без рекламных вывесок, больших светодиодных экранов.

Уличные светодиодные экраны созданы для того, чтобы работать в непростых городских условиях. Их используют для наружной рекламы, в спортивной индустрии, шоу, концертных программах, можно применять и для оповещения о чрезвычайных ситуациях.

В Донецкой Народной Республике светодиодные экраны похожи на рекламные щиты. В обычное время они транслируют информацию рекламного характера, а в чрезвычайной ситуации могут передавать информацию о том, что произошло и как людям себя вести. Экраны стоят на улицах и работают круглосуточно. В Донецке их 7. Отметим наличие звукового сопровождения при трансляции с экранов на площади Ленина и железнодорожном вокзале. Экран площадью 39 м² расположен на пересечении пр. Б. Хмельницкого и ул. Артёма.

Светодиодные экраны в Донецке отличаются большими размерами, динамичностью и яркостью изображения. Благодаря этому они заметны со значительного расстояния (более 500 м) и удерживают внимание людей в течение длительного времени. Продолжительный контакт человека с экраном и высокий уровень восприятия информации – залог успеха оповещения с помощью светодиодных экранов (рис. 3).



Рис. 3. Схема расположения светодиодных экранов

СМИ:

- печатные (газеты, журналы и др.);
- аудиовизуальные (радио, телевидение и др.);
- информационные службы (информационные агентства, пресс-службы и др.).

В случае чрезвычайной ситуации есть договорённость о том, что радиостанции в FM-диапазоне, а также телевидение предоставляют бесплатный эфир для сотрудников МЧС ДНР, которые разъяснят, как себя вести в той или иной чрезвычайной ситуации.

Сотовая связь. Идет процесс создания сотовой связи ДНР. В Донецкой Народной Республике начал работу собственный мобильный оператор «Феникс». Теперь есть возможность СМС-оповещения людей, находящихся в зоне чрезвычайной ситуации.

Пейджинговые системы связи. Пейджинговая связь появилась в середине 1950-х годов. Пейджинговые сети связи организованы по радиальному и сотовому принципам, могут быть односторонними и двухсторонними. Односторонние пейджинговые сети широко применяют, поскольку они предполагают сплошное покрытие всей зоны обслуживания.

Телевидение. Телевизионное вещание – наиболее результативное средство оповещения населения о чрезвычайной ситуации. В Донецке ведут вещание каналы в цифровом и аналоговом формате. На территории ДНР 22 декабря 2014 г. начал действовать прогрессивный стандарт вещания T2, который характеризуется более экономичным использованием радиочастот.

Другие меры. Используют и дополнительные способы оповещения. Например, в случае чрезвычайной ситуации может быть организован

поквартальный объезд города. Участковые, сотрудники местных ОВД будут курсировать по своему району на машинах с громкоговорителями. Информация также поступает к сотрудникам жилищных служб, которые передают её через сотрудников ЖЭК и ЖСК.

Выводы. Система связи и оповещения населения в чрезвычайных ситуациях должна быть модернизирована за счет использования современной материально-технической базы.

Список литературы / References

1. Соколов Ю.И. О некоторых проблемах развития систем оповещения населения в чрезвычайных ситуациях // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. – 2012. – Т.2, № 1. – С. 10 – 33.

Sokolov, Yu.I. (2012). *O nekotorykh problemakh razvitiya system opovesheniya naseleniya v chrezvychaynykh situatsiyakh* [About some problems of development of warning systems for the population in emergencies]. *Strategiya grazhdanskoj zashchity: problemy i issledovaniya*, vol. 2, no. 1, pp. 10 – 33.

2. Серов А.В. Спутниковое цифровое телевидение DVB –Т/Н. – СПб: БХВ – Петербург, 2010. – 464 с.

Serov, A.V. (2010). *Sputnikovoye tsifrovoye televideniye DVB –T/H*. [The satellite digital television DVB –T/H. St. Petersburg, BKhV – Petersburg, 464 p.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 02.02.2016*

Aleksandr Nikolayevich Slabchenko, head of department; e-mail: aleks-2591@yandex.ua; Batyr Dzhunisbayevich Inkarbayev, senior scientific associate; e-mail: in.boris@list.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 (+38062) 311-39-62

THE COMMUNICATION AND WARNING SYSTEM AS A PROTECTION MEAN OF THE POPULATION IN EMERGENCIES

Purpose. Determination of the ways and methods of modernization of the existing communication and warning system for the population in the emergencies.

Methods. Information investigations of the communication and warning system for the population in the emergencies.

Results. The ways of modernization of the communication and warning system for the population in the emergencies were proposed.

Scientific novelty. Experimental estimations and analysis of the existing communication and warning systems of the population in the emergencies for their modernization.

Practical value. Reduction of the time of warning the population. Improvement of the communication and warning system of the population in the emergencies.

Keywords: *communication system; siren; broadcasting system; light-emitting diode displays; warning of the population; emergency.*

УДК [621.565.9:546.171.1]:614.8."363"

Максим Владимирович Карцев, инж.; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; e-mail: catyrn00@mail.ru; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-69-52; 311-41-16

РЕЖИМЫ РАБОТЫ АММИАЧНЫХ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК ПРИ УГРОЗЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Цель. Выбор и обоснование параметров аммиачных холодильных установок для разработки автоматической системы раннего обнаружения угроз возникновения чрезвычайных ситуаций.

Методика. Аналитическое обобщение результатов информационных исследований по проблеме повышения уровня безопасности аммиачных холодильных установок.

Результаты. Исследованы причины возникновения опасных режимов работы аммиачной холодильной установки и определены критические параметры, при отклонении от которых могут возникнуть чрезвычайные ситуации.

Новизна. Предложено использование датчиков контроля опасных параметров работы существующих аммиачных холодильных установок и передачи этих данных системе раннего обнаружения угроз возникновения чрезвычайных ситуаций.

Практическая значимость. Использование системы раннего обнаружения угроз возникновения чрезвычайных ситуаций для контроля ряда параметров позволит повысить безопасную эксплуатацию аммиачных холодильных установок и предупредить о возможном возникновении аварии.

Ключевые слова: *безопасность; аммиак; чрезвычайная ситуация; холодильная установка; хладагент.*

Постановка проблемы. Несмотря на опасность работы с аммиаком, в роли холодильного агента он обладает самыми лучшими характеристиками по сравнению с другими холодильными агентами.

Аммиачные холодильные установки, разработанные в последнее время, отвечают требованиям безопасности. Одно из самых эффективных мероприятий по предотвращению утечек аммиака из холодильной машины – своевременное информирование о возможной аварийной ситуации, а также обучение персонала.

Из преимуществ аммиака следует отметить следующие:

- экологически чист, так как является одним из продуктов жизнедеятельности живых организмов;
- менее текуч, чем фреоны, не проникает сквозь кристаллическую решётку чёрных металлов;
- производительность компрессора при работе с аммиаком примерно в 3,5 раза превышает аналогичный показатель при работе с другими хладагентами;
- обладает сильным резким запахом, что позволяет своевременно определять и устранять утечку;
- дешевизна оборудования из-за возможности использовать чёрные металлы вместо цветных.

Как видно из табл. 1, аммиак не разрушает озоновый слой и не оказывает влияния на глобальное потепление, в отличие от других холодильных агентов. Аммиак не входит в список веществ, указанных в Монреальском протоколе, который вступил в силу 1 января 1989 г.

Таблица 1

Характеристики холодильных агентов

Характеристика	Дифтор-дихлор-метан Фреон R 12	Тетрафтор-этан Фреон R 134a	Хлор-дифтор-метан Фреон R 22	Азеотропная смесь R32 и R125 Фреон R 410a	Аммиак R 717
Химическая формула	CF_2Cl_2	CF_3CFH_2	CHClF_2	$\text{CF}_2\text{H}_2 + \text{C}_2\text{F}_5\text{H}$	NH_3
Молекулярная масса, г/моль	120,913	102,03	86,5	72,58	17,2
Температура кипения, °C	-29,74	-26,5	-40,85	-51,58	-33,3
Критическая температура, °C	112	101,5	96	72,1	132,5
Критическое давление, МПа	4,119	4,067	4,98	4,92	11,4
Критическая плотность, кг/м ³	579,1	538,5	512,8	488,9	686
Температура плавления, °C	-155,95	-101	-157,4	-101	-80
Озоноразрушающий потенциал ODP	1	0	0,055	0	0
Потенциал глобального потепления GWP	8500	1300	1900	1890	0

К сожалению, идеального холодильного агента пока не существует и очень мала вероятность того, что он в будущем появится. Свойства холодильных агентов до подписания Монреальского протокола описывались небольшим количеством параметров, а после к ним добавились характеристики, которые касались воздействия на окружающую среду и параметры азеотропных и зеотропных смесей. На основе всех этих параметров использование гидрофторуглеродов признали нежелательным из-за высокой стоимости замены холодильного агента и сложностей, возникающих при предотвращении утечек.

Количество аварий, которые связаны с утечкой аммиака из холодильных систем по отношению к общему количеству систем, невелико. Все аварии, которые привели к летальному исходу, учитывают (в Швеции – с 1940 г., в Великобритании – с 1986 г., в США – последние 11 лет). Благодаря этим данным в течение года шанс погибнуть от аммиака есть у двух человек из миллиарда (табл. 2).

В результате аварий в большинстве случаев вред здоровью наносится непосредственно персоналу, который находится вблизи источника утечки

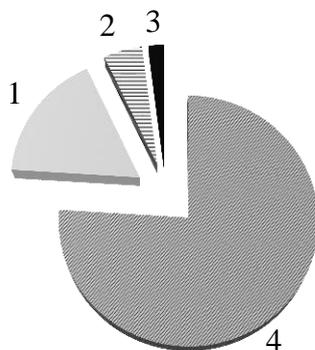
холодильного агента. Аварии, которые связаны с аммиаком, происходят не часто, но с тяжёлыми последствиями.

Таблица 2

Соотношение смертности из-за утечки аммиака, вследствие аварий, стихийных бедствий и несчастных случаев

Вид опасности	Отношение	Риск гибели
Отравление аммиаком в результате несчастного случая; поражение молнией	Приемлемо	1...3 чел. из $1 \cdot 10^{-9}$
Природные катаклизмы	Умеренная опасность	1 чел. из $1 \cdot 10^{-6}$ 1 чел. из $1 \cdot 10^{-5}$ 1 чел. из $1 \cdot 10^{-4}$
Несчастные случаи на транспорте; несчастные случаи на производстве; несчастные случаи вообще		1 чел. из $1 \cdot 10^{-3}$

Согласно работе [1] аварии на аммиачных холодильных установках классифицированы по категориям (см. рисунок).



Причины аварий на аммиачных холодильных установках:

- 1 – несовершенство систем охлаждения (17 %); 2 – дефект монтажа (5 %);
3 – заводской брак оборудования (2 %); 4 – несоблюдение правил эксплуатации (76 %)

Цель. Выбор и обоснование параметров аммиачных холодильных установок для разработки автоматической системы раннего обнаружения угроз возникновения чрезвычайных ситуаций.

Материалы и результаты исследований. Опасность использования аммиачных холодильных установок связывают исключительно с возможными утечками холодильного агента в результате выхода из строя оборудования [2]. По статистике, основной причиной возникновения аварий являются неквалифицированные действия персонала, обслуживающего холодильную установку, вследствие которых происходят гидравлические удары в

компрессорах, разрушение трубопроводов, в которых находится аммиак, а также разгерметизация технологического оборудования.

К наиболее опасным режимам работы аммиачных холодильных установок относят:

- высокое давление нагнетания;
- влажный ход компрессора;
- пониженное давление в испарителе;
- нарушение системы смазки и перегревание компрессора;
- высокая концентрация аммиака в помещении;
- нарушение режима работы аммиачных насосов;
- перегревание обмоток электродвигателя и короткое замыкание.

Высокое давление нагнетания. Чрезмерно высокое давление нагнетания может привести к нарушению герметичности аппаратов, а также вызвать их разрыв. Причиной высокого давления при неработающей холодильной машине в ресиверах или конденсаторе может служить повышенная температура окружающей среды, например в случае пожара, увеличение температуры охлаждающей воды или уменьшение её подачи, попадание воздуха в систему, загрязнение поверхности конденсатора, переполнение его маслом или холодильным агентом.

Аммиачную холодильную установку рассчитывают на температуру конденсации 40 °С и давление 1,5 МПа. Приборы автоматической защиты (реле высокого давления) настраивают таким образом, чтобы они отключали компрессор при давлении 1,4 МПа. Для машин с большой холодопроизводительностью компрессор комплектуют, кроме реле давления, предохранительным клапаном, который открывается и перепускает пары на сторону всасывания, когда разность давлений нагнетания и всасывания достигает 1,6 МПа. Помимо аварийной защиты применяют также и профилактическую, если прекратилась подача воды на конденсатор, компрессор должен отключаться. Применяют реле расхода воды, которое отключает компрессор в случае снижения расхода воды.

Влажный ход компрессора. При работе в компрессор вместе с отсасываемыми парами из испарителя может попасть жидкий холодильный агент, такой режим называют влажным ходом компрессора. В этом случае происходит снижение его производительности и, самое главное, возникает опасность гидравлического удара поршня по клапанной доске, что очень опасно в аммиачных установках. Причиной попадания холодильного агента может служить переполнение им отделителя жидкости, ресивера, промежуточного сосуда или испарителя, переполнение установки хладагентом, обмерзание испарителя, и прямое воздействие на испаритель солнечных лучей. В целях недопущения влажного хода компрессора разница между температурой всасывания и температурой кипения должна быть не менее 5 °С. В случае уменьшения перегрева реле разности температур должно остановить компрессор.

Пониженное давление в испарителе. Снижение давления в испарителе и пониженная температура кипения может привести к замерзанию хладоносителя (для рассольных систем охлаждения), что часто вызывает разрыв трубок в

кожухотрубных испарителях и серьёзные аварии. В целях защиты от пониженного давления всасывания устанавливают реле давления, которое отключает компрессор, когда оно становится ниже на 0,05 МПа, чем было в момент включения компрессора. Также устанавливают реле расхода, которое при уменьшении расхода хладоносителя останавливает компрессор.

Нарушение системы смазки и перегревание компрессора. Высокая температура нагнетания может вызвать пригорание масла, так же приводит к повышенному износу цилиндров компрессора. Причиной повышения температуры могут быть неисправности компрессора, а именно: увеличенные зазоры поршневых колец, поломка нагнетательных клапанов, что приводит к перепуску сжатых паров на сторону всасывания, так же уменьшение расхода или повышение температуры охлаждающей воды в водяной рубашке компрессора, высокое давление в конденсаторе холодильной машины. Температура нагнетания должна быть не более 150 °С. С помощью реле осуществляется отключение компрессора, при этом чувствительный элемент установлен на нагнетательном трубопроводе или в верхней крышке компрессора. Перегревание компрессора может быть вызвано нарушением системы смазки, при этом необходимо контролировать температуру масла, а не отдельных узлов.

Высокая концентрация аммиака в помещении. На холодильных установках, где нет круглосуточного обслуживания, применяют сигнализаторы концентрации аммиака, в случае повышения массовой концентрации до 0,5...1 мг/л прибор должен дать предупредительный сигнал в помещение постоянного поста охраны. Рекомендуется на каждые 75...100 м² устанавливать по одному датчику.

Нарушение режима работы аммиачных насосов. Для обеспечения нормального режима работы насоса подпирание жидкости на стороне всасывания должно быть не менее 1,5...2 м. В том случае, если напор, который создаёт насос, меньше на 0,8 номинального, то реле разности давлений нагнетания и всасывания должны его остановить.

Перегревание обмоток электродвигателя и короткое замыкание. Обмотка электродвигателя рассчитана на определённую силу тока. В определённых случаях (при повышении потребляемой мощности, заклинивании компрессора) сила тока значительно возрастает. Для защиты обмоток применяют тепловые реле. В случае длительной токовой перегрузки более 35 % реле должны отключать электродвигатель не более чем за 0,5 ч, при перегрузке 60...70 %, которая может возникнуть в случае обрыва фазы при работающем двигателе, – за 2...5 мин, при 4-кратной перегрузке, которая возникает при пуске двигателя на двух фазах, – за 10...40 с.

Потенциально опасный объект – это объект, на котором используют, производят, перерабатывают, хранят, или транспортируют радиоактивные, пожаровзрывоопасные, опасные химические и биологические вещества, создающие реальную угрозу возникновения источника чрезвычайной ситуации, а также другие объекты, которые при определенных обстоятельствах могут создать реальную угрозу возникновения чрезвычайной ситуации.

Промышленная холодильная установка, использующая в своем технологическом цикле аммиак, относится к потенциально опасным объектам, так как имеет в своем составе сосуды, работающие под давлением, химически или экологически опасные вещества, взрывопожароопасные вещества, механизмы движения, электроопасные механизмы.

Аммиак имеет среднее значение смертельной концентрации в воздухе, приводящей к гибели живых организмов.

На потенциально опасных объектах для обеспечения безопасности и своевременного информирования о возможных авариях действующими нормативными документами предусмотрена установка систем раннего обнаружения угроз возникновения чрезвычайных ситуаций.

Вывод. На основе анализа опасных режимов работы установлено, что в аммиачной холодильной установке предусмотрены различные средства защиты (реле давления, реле температуры, тепловые реле, реле уровня и др.), наличие которых необходимо для безопасной эксплуатации аммиачной холодильной машины. Однако в процессе работы холодильной установки возникают отклонения от нормального режима работы, которые не приводят к срабатыванию средств защиты.

В связи с этим необходимо разработать автоматическую систему раннего обнаружения угроз возникновения чрезвычайных ситуаций в целях защиты персонала, обслуживающего холодильную установку, и населения, которое проживает вблизи от опасного объекта и может попасть в зону возможного заражения при аварии. Система должна контролировать достижение критических значений параметров (температуру, давление, уровень масла, расход охлаждающей жидкости) и при возникновении чрезвычайных ситуаций автоматически включать систему оповещения и передавать сигнал на пост диспетчерской службы МЧС.

Список литературы / References

1. Крюковська О.А., Маховський В.О. Аналіз аварійних ситуацій і аварій аміачно-холодильних установок на підприємствах харчової та переробної промисловості [Електронний ресурс]. – Режим доступа: www.rusnauka.com/3_ANR_2011/Tecnic/1_77915.doc.htm (дата обращения: 25.12.2015).

Kriukovs'ka, O.A., Makhovs'kyi, V.O. *Analiz avariinykh situatsii i avarii amiachno-kholodylnykh ustanovok na pidprijemstvakh kharchovoi ta pererobnoi promyslovosti [Elektronnyi resurs]* [Analysis of incidents and accidents of the ammoniac refrigerating plants at the enterprises of the food processing and processing industry [Electronic resource]. – Available at: www.rusnauka.com/3_ANR_2011/Tecnic/1_77915.doc.htm (Accessed 25 December 2015).

2. Бахвалов О.А. Основные причины аварий при эксплуатации аммиачных холодильных систем // Холодильная техника. – 2001. – № 7. – С. 11 – 12.

Bakhvalov, O.A. (2001). *Osnovnyye prichiny avariyy pri ekspluatatsii ammiachnykh kholodilnykh sistem* [The principal causes of accidents by operation of the ammoniac refrigerating systems]. *Kholodilnaya tekhnika*, no. 7, pp. 11 – 12.

3. Будущее аммиака как хладагента // Мир климата. – 2008. – № 51. – С. 74 – 76.

Budushcheye ammiaka kak khladagenta [The future of ammonia as cooling agent] (2008). *Mir klimata*, no. 51, pp. 74 – 76.

4. Патлан С.И. Повышение безопасности аммиачных холодильных установок / Мат. семинара «Безопасность – 2009» Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору Пермского межрегионального управления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://tehsovet.ru/404/1144.html> (дата обращения: 25.12.2015).

Patlan, S.I. *Povysheniye bezopasnosti ammiachnykh kholodil'nykh ustanovok* [Safety improvement of the ammoniac refrigerating plants] / *Mat.seminara "Besopasnost – 2009" Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru Permskogo mezhhregional'nogo upravleniya [Elektronnyy resurs]* / [Materials of the workshop “Safety – 2009” of the Federal Service on ecological, technological and atomic supervision of the Perm interregional governance] [Electronic resource]. Available at: <http://tehsovet.ru/404/1144.html> (Accessed 25 December 2015).

5. Мещеряков Ф.Е. Основы холодильной техники и холодильной технологии. – М.: Пищевая промышленность, 1975. – 560 с.

Meshcheryakov, F.Ye. (1975). *Osnovy kholodil'noy tekhniki i kholodil'noy tekhnologii* [Basic foundation of the refrigerating equipment and refrigerating technology]. Moscow: Pishchevaya promyshlennost Publ., 560 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 28.01.2016

Maxim Vladimirovich Kartsev, engineer; the “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR; e-mail: catyrn00@mail.ru; 283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phones (+38062) 311-69-52; 311-41-16

OPERATION MODES OF THE AMMONIAC REFRIGERATING PLANTS BY THE HAZARD OF ORIGIN OF EMERGENCIES

Purpose. Choice and substantiation of parameters of the ammoniac refrigerating plants to develop the automatic system for the early warning of the hazards of origin of emergencies.

Methods. Analytical generalization of results of information investigations on the problem of rise of the safety level of the ammoniac refrigerating plants.

Results. The causes of occurrence of the hazardous operation modes of the ammoniac refrigerating plant were investigated, and the critical parameters by departure from which the emergencies may occur were determined.

Novelty. The use of sensors to control the hazardous operation parameters of the existing ammoniac refrigerating plants and to transfer these data to the system of the early warning of the hazards of origin of emergencies were proposed.

Practical value. The use of the system of the early warning of the hazards of origin of emergencies to control a number of parameters will allow improving the safe operation of the ammoniac refrigerating plants and warning about the possible occurrence of the accident.

Keywords: *safety; ammonia; emergency; refrigerating plant; cooling agent.*

III. Охрана труда

УДК 614.894.7

Руслан Сергеевич Плетенецкий, нач. отд.; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-39-73

ВЛИЯНИЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ ВДЫХАЕМОГО ВОЗДУХА В АППАРАТАХ С ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМ КИСЛОРОДОМ

Цель. Исследование влияния тепловлаagoобменных процессов на параметры вдыхаемого воздуха в изолирующем дыхательном аппарате с химически связанным кислородом.

Методика. Расчётно-экспериментальные методы исследований тепловлаagoобменных процессов в дыхательном аппарате на лабораторных стендах.

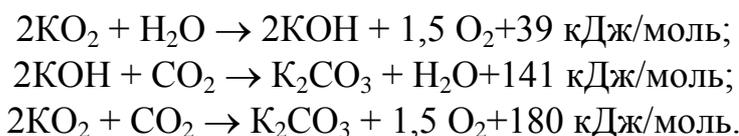
Результаты. Проведенные исследования показали возможность снижения температуры вдыхаемого воздуха при использовании тепловлаagoобменника до нормированных значений.

Новизна. Установлена зависимость температуры вдыхаемого воздуха от его влажности в изолирующем дыхательном аппарате, отличающаяся тем, что при её расчете учтена удельная теплота парообразования воды, что позволяет снизить температуру вдыхаемого воздуха и повысить комфортность эксплуатации аппарата.

Практическая значимость. Полученные результаты экспериментальных исследований позволят учитывать влияние тепловлаagoобменника на температуру вдыхаемого регенерированного воздуха при разработке конструкций новых подобных аппаратов.

Ключевые слова: *изолирующие аппараты; защита органов дыхания; самоспасатель; химически связанный кислород; надпероксид калия; тепловлаagoобменник; адсорбент; регенерация.*

Постановка проблемы. При протекании регенеративного процесса в изолирующем дыхательном аппарате, снаряженном кислородсодержащим веществом на основе надпероксида калия KO_2 , происходят химические реакции, связанные с поглощением из выдыхаемого человеком воздуха водяных паров и диоксида углерода, выделением кислорода и теплоты [1]:



Таким образом, в отработанном продукте накапливаются гидроксид калия KOH и карбонат калия K_2CO_3 . В присутствии неотработанного (непрореагировавшего) KO_2 эти компоненты образуют эвтектические смеси $\text{KOH} - \text{K}_2\text{CO}_3 - \text{KO}_2$, т.е. композиции, плавящиеся при более низких температурах, чем исходные компоненты (температура плавления KOH , K_2CO_3 и KO_2 соответственно 404, 891 и 535 °С). Так как наиболее легкоплавким из перечисленных веществ является KOH , то от его накопления в продукте будет зависеть эффективность поглощения CO_2 и интенсивность процесса спекания [2].

Если в газовой смеси, поступающей в регенеративный патрон, будет значительное количество влаги, то это способствует накоплению КОН и быстрому образованию легкоплавких эвтектик. И наоборот, при меньшей доле влаги в выдыхаемой газовой смеси образование эвтектик будет замедленно в связи с медленным накоплением КОН, что будет способствовать увеличению продолжительности активного периода работы дыхательного аппарата.

Поскольку процесс регенерации является экзотермическим, т.е. сопровождающимся большими тепловыделениями и значительным осушением газовой дыхательной смеси, то это приводит к повышению температуры вдыхаемого из аппарата воздуха до 75 °С, снижению его относительной влажности до 20 %, повышению сопротивления дыханию и значительному нагреванию конструктивных элементов самоспасателя, в конечном итоге – к дискомфорту применения дыхательного аппарата.

Наряду с химическим процессом происходят и различные физические процессы, связанные с массо- и теплообменом, плавлением и спеканием продуктов реакции. Осуществляя кондиционирование выдыхаемой человеком смеси путем изменения её влажности, можно оптимизировать процессы регенерации в патроне в части более экономного расходования продуктом запаса кислорода, обеспечения эффективного поглощения CO₂ и улучшения температурно-влажностных параметров вдыхаемого воздуха.

Анализ исследований. Теоретически регенеративный процесс необходимо регулировать таким образом, чтобы как можно дольше происходило плавление продуктов реакций, а спекание начиналось после полного израсходования запаса кислорода и было неинтенсивным. Обеспечить такие условия протекания регенеративного процесса в патроне дыхательного аппарата можно кондиционированием вдыхаемого воздуха с помощью тепловлажообменника – специального конструктивного устройства, расположенного на маятниковом участке воздухопроводной системы самоспасателя, поглощающего влагу на выдохе и отдающего её на вдохе. Тепловлажообменник должен быть изготовлен из устойчивых в сухой среде материалов, обладать относительно высокой влагоемкостью, быть эффективным по тепловлажообмену при многократно повторяющихся циклах «вдох-выдох».

В качестве влажообменного материала были проанализированы различные гигроскопичные материалы, способные к физической адсорбции водяных паров: капроновые и амидные (полиамидные) волокна, которые не вносят существенного вклада в аэродинамическое сопротивление, не усложняют конструкцию дыхательного аппарата, легко регенерируются сухой газовой смесью при температуре до 60...70 °С и не выделяют при хранении и работе вредных или дурнопахнущих веществ.

Самым эффективным, нетрудоемким при изготовлении и безопасным для дыхания является тепловлажообменник с насадкой из нескольких слоев металлических сеточек или тампона путанных металлических тонких нитей («мочалка»).

Поскольку реакция поглощения влаги из выдыхаемого воздуха экзотермична (теплопродукция при поглощении 1 моля воды равна 70...90 кДж), предварительное осушение воздуха, поступающего в регенеративный патрон, уменьшает и общее количество теплоты, выделяемой продуктом. Так, при регенерации 1 кг выдыхаемого воздуха только за счёт поглощения влаги продукт выделяет около 130 кДж теплоты, что составляет 34 % от общей теплопродукции. Снижением влажности воздуха уменьшается и количество выделяемой теплоты [3].

При нагрузке средней тяжести лёгочная вентиляция равна 35 дм³/мин, частота дыхания 20 мин⁻¹, объем одного выдоха 1,75 дм³, количество водяного пара в выдыхаемом воздухе – около 0,088 г. В динамике дыхания это количество водяного пара может изменяться.

При выдохе на поверхности волокон или металлических сеток тепловлагообменника конденсируется часть влаги проходящего воздуха, а при вдохе сухой и более нагретый воздух из регенеративного патрона отдаёт часть своей теплоты на испарение этой влаги, в связи с чем сам увлажняется и при этом охлаждается. Таким образом создаются более комфортные условия дыхания в самоспасателе.

Результаты исследований. Тепловлагообменник в самоспасателе представляет собой пластмассовую коробку с двумя патрубками, к которым присоединяется загубник и гофрированная дыхательная трубка. В полости коробки размещается тампон (насадка) из анидного (капронового) волокна массой до 3 г или металлических нитей массой 7...10 г.

Результаты экспериментальных исследований самоспасателей показали, что кондиционирование вдыхаемого из самоспасателя воздуха за счет применения тепловлагообменника увеличивает время его защитного действия на 15...20 %. Так, время защитного действия малогабаритного аппарата без тепловлагообменника – всего 15 мин вместо 30 мин из-за достижения предельной температуры вдыхаемого воздуха 60 °С. При испытании с тепловлагообменником время защитного действия самоспасателя – от 35 до 37 мин, температура вдыхаемого воздуха снижалась от 10 до 15 °С и достигала предельного значения в самом конце времени защитного действия, т.е. после 30 мин (рис. 1).

Температура вдыхаемого человеком воздуха из самоспасателя находится в зависимости от относительной влажности этого воздуха: чем суше воздух, тем выше температура. Результаты экспериментальных исследований динамики относительной влажности ϕ газовой смеси в дыхательном аппарате с ТВО (в виде металлических нитей массой 7...8 г, сопротивлением до 30 Па) представлены на рис. 2. Динамика изменения влажности ϕ воздуха, поступающего на тепловлагообменник, описана уравнением аппроксимации: $y = 0,0986x^2 - 4,4478x + 110,61$; изменение влажности ϕ воздуха, поступающего в регенеративный патрон после тепловлагообменника: $y = 0,0719x^2 - 3,5927x + 71,196$.

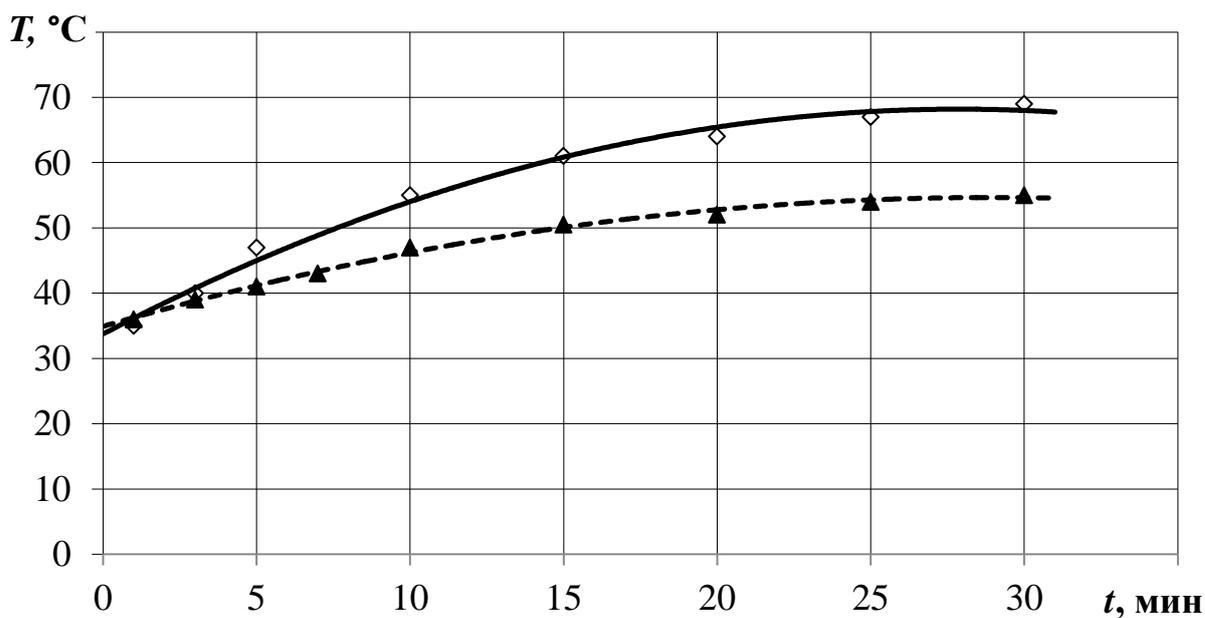


Рис. 1. Динамика температуры T вдыхаемого воздуха в зависимости от наличия теплообменника:

◇ – без теплообменника; ▲ – с теплообменником

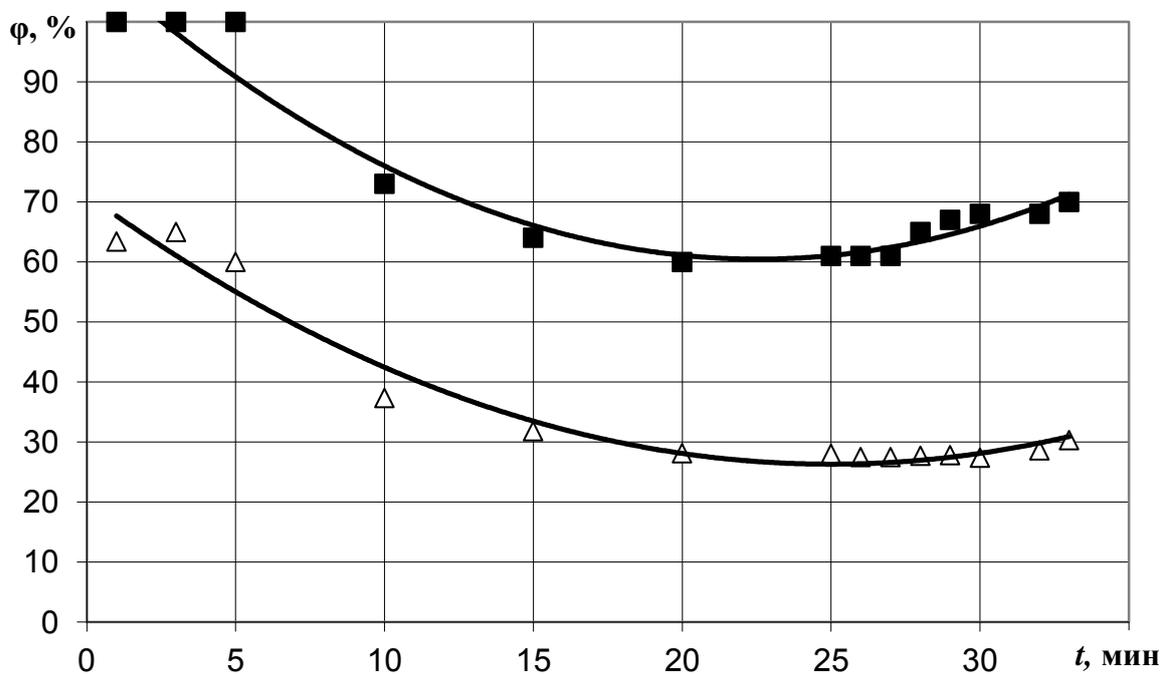


Рис. 2. Динамика влажности выдыхаемого воздуха ϕ :

■ – поступающего на теплообменник из дыхательной системы человека;
 △ – поступающего в регенеративный патрон после теплообменника

Особенностью установленной зависимости является постепенное снижение относительной влажности выдыхаемого воздуха от 100 до 60 % в течение первых 20 мин дыхания в самоспасателе. Это обусловлено осушающим действием регенеративного продукта при протекании химических реакций сорбции углекислоты. После 24-й минуты работы регенеративного патрона наблюдается постепенное повышение относительной влажности воздуха. Это вызвано происшедшим насыщением регенеративного продукта выдыхаемой влагой, которая по-прежнему продолжает поступать в патрон из дыхательных путей человека. Кроме того, как следует из вышеприведенных реакций, на определенном этапе начинается выделение H_2O из гидроксида калия KOH в процессе поглощения диоксида углерода CO_2 .

Установлена зависимость относительной влажности ϕ от температуры выдыхаемого воздуха (рис. 3).

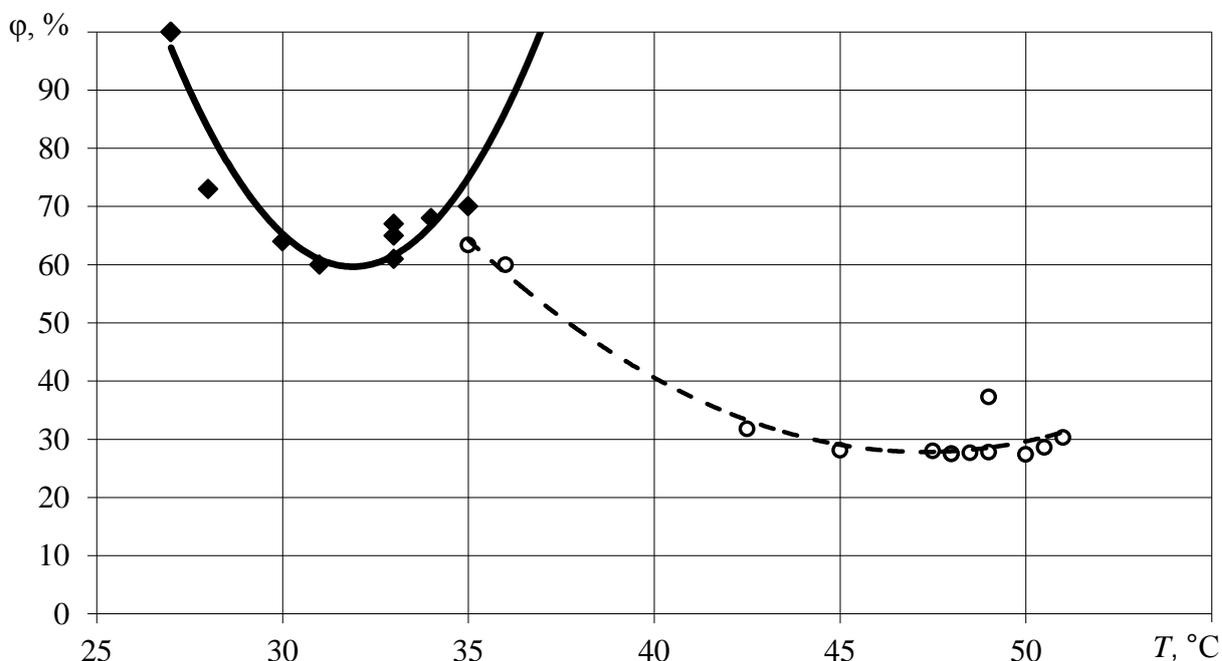


Рис. 3. Зависимость относительной влажности ϕ от температуры T выдыхаемого на ТВО воздуха:

- ♦ – поступающего на тепловлагообменник из дыхательной системы человека;
- – поступающего в регенеративный патрон после тепловлагообменника

Анализ результатов свидетельствует, что минимальная влажность выдыхаемого воздуха достигается при температуре 31...33 °C на участке от воздухопроводных путей человека до ТВО (что соответствует 15...29 мин) и при температуре 47...50 °C на участке от ТВО до регенеративного патрона.

Изменение влажности на 31 %, происходящее при прохождении воздуха через ТВО, соответствует конденсации и испарению 0,027 г воды за один дыхательный цикл.

Количество теплоты Q , Дж, переданной данной массе воды при превращении её в пар, равно

$$Q = \lambda m_{\text{вод}}, \quad (1)$$

где λ – удельная теплота парообразования; $\lambda_{\text{воды}} = 22,60 \cdot 10^5$ Дж/кг;
 $m_{\text{вод}}$ – масса, кг.

Из формулы (1) находим, что при одном дыхательном цикле теплота, переданная жидкости при превращении в пар, равна $0,61 \cdot 10^2$ Дж.

Рассчитываем теоретически возможное снижение температуры вдыхаемого воздуха по формуле (2):

$$\Delta t = Q / (c \rho v), \quad (2)$$

где Δt – изменение температуры °С;
 c – удельная теплоёмкость вещества, Дж/(кг·°С);
 ρ – плотность воздуха, кг/м³;
 v – объём одного дыхательного цикла, м³.

Приняв удельную теплоёмкость вдыхаемого воздуха, равной 1,005 кДж/(кг·°С), а плотность 1,14 кг/м³ (при температуре 35 °С), получим расчетное снижение температуры вдыхаемого воздуха, равное 30,43 °С.

Подобное снижение температуры вдыхаемого воздуха происходило бы в том случае, если бы вся теплота, которая выделяется при конденсации пара, успевала рассеиваться с поверхности теплообменника перед очередным вдохом. В реальных же условиях определённое количество теплоты накапливается во влагообменном материале, что приводит к снижению расчетного эффекта теплообменника.

Таким образом, для улучшения работы теплообменника необходимо обеспечивать более быструю и полную теплоотдачу в окружающую среду с поверхности его корпуса.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования позволили установить влияние кондиционирования выдыхаемого воздуха на параметры вдыхаемой газовой смеси и получить численное значение снижения температуры вдыхаемого воздуха в зависимости от его влажности.

Список литературы / References

1. Ильинский Э.Г., Бурего Н.Н., Зборщик Л.А. Повторное использование регенеративного продукта изолирующих самоспасателей // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД. – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 152 – 159.
 Il'inskiy, E.G., Burego, N.N., Zborshchik, L.A. (2010). *Povtornoye ispol'zovaniye regenerativnogo produkta izoliruyushchikh samospasateley* [The repeated use of the regenerative product of the self-contained self-rescuers].

Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr./NIIGD "Respirator" [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, issue 47, pp. 152 – 159.

2. Синтез надперекиси калия / Ю.А. Ферапонтов, А.А. Гурьев, Д.В. Жданов и др. // Тр. VIII региональной конф. «Проблемы химии и химической технологии». – Воронеж, 2000. – С. 340.

Ferapontov, Yu.A., Gur'yev, A.A., Zhdanov, D.V. etc. (2000). *Sintez nadperekisi kaliya* [Synthesis of potassium superoxide]. *Tr. 8th regional'noy konf. "Problemy khimii i chimicheskoy tekhnologii"* [Proc. of the 8th Regional conference "Problems of chemistry and chemical technology"]. Voronezh, p. 340.

3. Диденко Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. – М.: Недра, 1984. – 168 с.

Didenko, N.S. (1984). *Regenerativnyye respiratory dlya gornospasatel'nykh rabot* [Closed-circuit breathing apparatus for mine-rescue operations]. Moscow: Nedra Publ., 168 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 27.01.2016

Ruslan Sergeevich Pletenetskiy, head of department; the "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru; 283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38062) 311-39-73

INFLUENCE OF THE CONDITIONING ON THE INHALED AIR PARAMETERS IN THE BREATHING APPARATUS, CHEMICAL OXYGEN TYPE

Purpose. Investigation of the influence of heat and moisture exchange processes on the inhaled air parameters in the self-contained breathing apparatus, chemical oxygen type.

Methods. Experiment-calculated methods of investigations of the heat and moisture exchange processes in the breathing apparatus on the laboratory test benches.

Results. The investigations carried-out showed the possibility of decrease of the inhaled air temperature by the use of the heat and moisture exchanger to the values standardized.

Novelty. The dependence of the inhaled air temperature on its humidity in the self-contained breathing apparatus distinguishing by that fact that the specific heat of water evaporation is taken into account by its calculation, what permits to decrease the inhaled air temperature and to increase the comfort of the apparatus operation, was established.

Practical value. The results of the experimental investigations received will allow taking into consideration the influence of the heat and moisture exchanger on the temperature of the regenerated inhaled air by working-out the constructions of the new analogous apparatus.

Keywords: *self-contained apparatus; protection of breathing organs; self-rescuer; chemically bound oxygen; potassium superoxide; heat and moisture exchanger; adsorbent; regeneration.*

УДК 614.895.5 - 037

Геннадий Вячеславович Завьялов, науч. сотр.; Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; e-mail: zavyalov57@mail.ua; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 311-69-62

ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕПЛОЗАЩИТНОЙ ОДЕЖДЫ

Цель. Оценка современных материалов для их использования при изготовлении конструктивных элементов специальной защитной одежды спасателей, предохраняющей от воздействия высоких температур.

Методика. Сравнительный анализ наиболее вероятных опасных факторов пожара, воздействующих на спасателя, требований нормативных документов к специальной защитной одежде спасателя от теплового воздействия, современных материалов для ее изготовления.

Результаты. С учетом конструктивных особенностей специальной защитной одежды спасателя от воздействия высоких температур и требований, предъявляемых к конструктивным элементам, обоснован выбор материалов, обладающих наилучшими характеристиками.

Научная новизна. При выборе материалов для изготовления специальной защитной одежды спасателей от воздействия высоких температур использован комплексный подход, который позволяет учесть их механические, термозащитные и физико-химические свойства применительно к конструктивным элементам защитной одежды.

Ключевые слова: температура; теплообмен; защитная одежда; тепловые воздействия; спасатель; термозащитные свойства.

Постановка проблемы. Специальная защитная одежда спасателей от тепловых воздействий, которую используют в подразделениях пожарно-спасательной службы МЧС, была разработана во второй половине прошлого века на основе брезентовых и парусиновых тканей со специальной обработкой, которая не в полной мере защищает от опасных факторов пожара. Вопрос защиты спасателей от воздействия теплового излучения и повышенных температур при выполнении ими служебных обязанностей по-прежнему остается актуальным.

Оперативные сотрудники МЧС, в ходе ликвидации пожаров и чрезвычайных ситуаций, подвержены воздействию множества различных опасных и вредных факторов, характерных также и для других отраслей промышленности – движущиеся машины и механизмы, электрический ток, повышенная температура поверхностей оборудования, повышенные уровни шума, вредные газы, жидкие химические вещества, недостаточная освещенность рабочей зоны и др. [1].

Вместе с тем наиболее вероятными факторами, воздействующими на спасателя на пожаре, являются: пламя и искры, повышенная температура окружающей среды [2, 3]. Расследования несчастных случаев показывают, что около 29 % спасателей при ликвидации аварий и пожаров получали травмы в результате воздействия открытого пламени или интенсивного теплового потока. Примером такого развития событий служит пожар, возникший 8 июня 2015 г. на территории нефтебазы общества с ограниченной

ответственностью «БРСМ-нефть» в пгт Глеваха Васильковского района Киевской области. В результате воздействия теплового излучения и конвективных потоков от горящего топлива в ходе тушения пожара пострадало 20 человек, из них 6 случаев со смертельным исходом.

Следовательно, специальная защитная одежда от воздействия высоких температур должна разрабатываться на основании современных материалов и тканей с более совершенными защитными свойствами для обеспечения эффективной защиты спасателей.

Цель исследования. Целью исследований является оценка современных материалов для их использования при изготовлении конструктивных элементов защитной противотепловой одежды.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

- с учетом конструктивных особенностей защитной противотепловой одежды выполнить анализ требований, предъявляемых к материалам, которые используют для изготовления каждого слоя специальной одежды;
- из ассортимента современных термостойких материалов для каждого слоя многослойной конструкции выбрать материал с оптимальными характеристиками, обеспечивающими требуемую степень защиты.

ГОСТ Р53264-2009 «Специальная защитная одежда пожарных» определяет минимальные эксплуатационные требования к материалам огнезащитной спецодежды, методы лабораторных испытаний, а также требования к конструктивному исполнению такой спецодежды. С введением в действие данного стандарта потребитель получает возможность объективной оценки и сравнения эксплуатационных характеристик всех образцов огнезащитной спецодежды.

В обобщенном виде требования, предъявляемые к специальной защитной одежде в зависимости от ее типа, представлены в табл. 1 указанного выше стандарта.

Таблица 1

Требования, предъявляемые к специальной защитной одежде

Показатель	Боевая одежда пожарных	Противотепловая одежда			Защитная изолирующая одежда, тип II
		легкого типа	полу-тяжелого типа	тяжелого типа	
Устойчивость к воздействию теплового потока:					
5,0 кВт/м ² , с, не менее	240	–	–	–	240
10,0 кВт/м ² , с, не менее	–	480	900	–	–
14,0 кВт/м ² , с, не менее	–	–	–	–	180
18,0 кВт/м ² , с, не менее	–	–	600	960	–
25,0 кВт/м ² , с, не менее	–	–	–	240	–
40,0 кВт/м ² , с, не менее	–	–	–	120	–

Окончание табл. 1

Показатель	Боевая одежда пожарных	Противотепловая одежда			Защитная изолирующая одежда, тип II
		легкого типа	полу-тяжелого типа	тяжелого типа	
Устойчивость к однократному воздействию открытого пламени, с, не менее	5	15	20	30	5

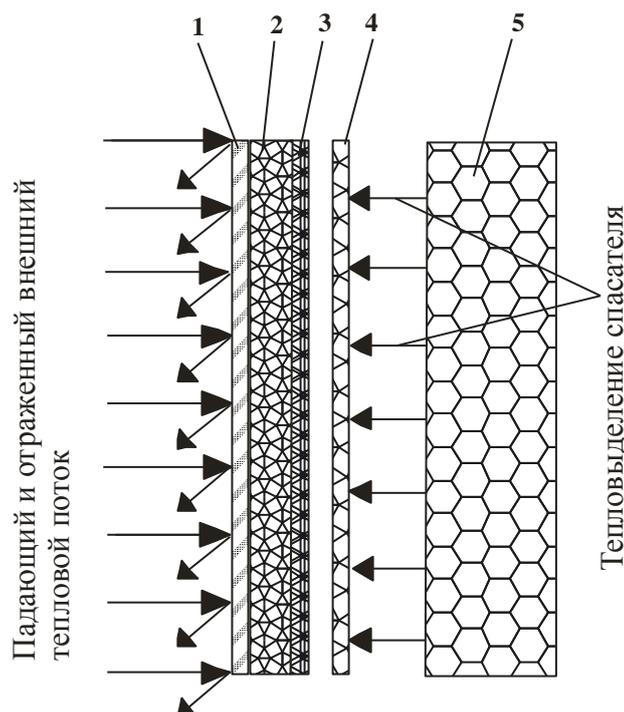
Для защиты от термических факторов (открытого пламени и повышенных тепловых воздействий) спецодежда должна выполнять две основные функции: не воспламеняться и задерживать мощный тепловой поток. Для выполнения указанных функций материалы огнезащитной спецодежды должны одновременно обладать:

- огнестойкостью – не должны поддерживать горение на воздухе;
- теплостойкостью – не должны расплавляться, давать термическую усадку, разрушаться;
- теплозащитой – должны эффективно задерживать тепловую энергию, распространяющуюся посредством теплопроводности, конвективного и лучистого теплообмена.

Противотепловая одежда изготовлена с использованием материалов с металлизированными покрытиями и предназначена для защиты спасателя от повышенных температур (интенсивного теплового излучения, окружающей среды с высокой температурой, кратковременного контакта с открытым пламенем), механических воздействий и других вредных факторов, возникающих при тушении пожаров и проведении аварийно-спасательных работ в непосредственной близости к открытому пламени [3, 4].

Принципиальная схема построения противотепловой одежды представлена на рисунке, где показана пассивная тепловая защита, обеспечиваемая применением пакета материалов с низкой теплопроводностью и высокой теплоемкостью без обеспечения активного теплосъема хладоносителями с принудительной циркуляцией. В качестве дополнительной защиты в такой одежде выступает термобелье с дополнительным воздушным зазором между ним и основным пакетом материалов.

Эффективность защитной спецодежды на 70 % зависит от правильного выбора материалов, из которых она изготовлена. Понимание взаимосвязи условий труда с эксплуатационными требованиями к противотепловой одежде и знание свойств материалов формируют основу процесса принятия решения по выбору защитных материалов. Материалы специальной защитной одежды должны выбираться исходя из адекватного уровня защиты, соответствующего риску.



Конструктивные элементы специальной защитной противотепловой одежды спасателей:

- 1 – материал верха; 2 – теплоизоляционная подкладка;
3 – внутренний слой; 4 – термобелье; 5 – тело спасателя

Результаты исследований. Огнестойкость материалов можно оценивать по значению кислородного индекса (КИ), обозначающего минимальную объемную долю кислорода в окружающем пространстве, при котором возможно свечеобразное горение данного материала (табл. 2). Текстильные материалы с $КИ > 21$ не предрасположены к поддержанию устойчивого горения на воздухе. Волокна и ткани с кислородным индексом, равным 26-28, имеют тенденцию к замедлению горения на воздухе и проходят элементарные тесты на воспламенение полоски ткани. Материалы с $КИ > 30$ имеют хорошие огнезащитные свойства [5].

Таблица 2

Температуры пиролиза и фазовых переходов распространенных волокон

Волокно	$T_g, ^\circ\text{C}$	$T_m, ^\circ\text{C}$	$T_p, ^\circ\text{C}$	$T_c, ^\circ\text{C}$	$T_f, ^\circ\text{C}$	КИ, % кисл. индекс
	стеклование	плавление	пиролиз	загорание	пламя	
Шерсть	-	-	245	570...600	680...825	25
Хлопок	-	-	350	350	974	18,4
Вискоза	-	-	350	420	-	18,9
Нейлон 6	50	215	431	450	-	20...21,5
Нейлон 6.6	50	265	403	530	861	20...21,5

Окончание табл. 2

Волокно	T_g , °C	T_m , °C	T_p , °C	T_c , °C	T_f , °C	КИ, %
	стеклование	плавление	пиролиз	загорание	пламя	кисл. индекс
Полиэстер	80...90	255	420...447	480	649...820	20...21
Акрил	100	>220	290	>250	910...1050	18,2
П-пропилен	20	165	470	550	-	18,6
Модакрил	<80	>240	273	690	-	29...30
ПВХ	<80	>180	>180	450	-	37...39
М-арамид	275	375	>425	>500	-	29...30
П-арамид	340	560	>590	>550	-	29
Kermel®	340	430	>450	>500	-	32

Способность материалов выдерживать повышенные температуры, не изменяя своих физических характеристик, называется теплостойкостью. У термопластичных волокон физические изменения от нагревания наступают при так называемых температурах стеклования (размягчения) T_g и плавления T_m , а химические изменения имеют место при температуре пиролиза T_p , когда наступает термическая деструкция полимера, за которой следует возгорание при температуре T_c .

Чем ниже температуры физических изменений (стеклования T_g и плавления T_m), тем хуже теплостойкость материала. Для распространенных текстильных волокон, таких, как полипропилен, полиэстер, нейлон (полиамид 6 и полиамид 6.6) соответствующие низкие температуры стеклования T_g и плавления T_m означают низкую теплостойкость. Поглощая тепловую энергию, такие материалы будут не только усаживаться и деформироваться, но и начнут плавиться, разрушая текстильную структуру с трагическими последствиями для спасателя [5]. При термической усадке ткани из таких волокон исчезают пододежные воздушные зазоры (эффект термоусадки), что серьезно увеличивает процент и степень тяжести термических ожогов спасателя. Для теплозащитной одежды рекомендованы нетермопластичные теплостойкие материалы с высокими температурами фазовых переходов (физических изменений), которые не плавятся, а медленно карбонизируются с минимальной усадкой.

Из табл. 2 видно, что под воздействием высоких температур арамиды не плавятся, а начинают медленно карбонизироваться, они не поддерживают горения на воздухе, так как имеют КИ > 29.

Энергия лучистой теплоты (тепловое излучение) передается без участия передающей среды, посредством электромагнитных волн, испускаемых нагретыми поверхностями или пламенем. Тепловое излучение несет тепловую энергию, главным образом, в видимой и инфракрасной части электромагнитного спектра. Это инфракрасное излучение поглощается молекулярной структурой волокон и покрытий поверхности ткани и может

быть выше 300 °С. Этого уже само по себе достаточно для термической деструкции (пиролиза) и даже возгорания большинства известных полимеров (см. табл. 2). Как правило, именно лучистая теплота становится причиной быстрого распространения пламени на окружающие предметы посредством их дистанционного разогревания с последующим воспламенением [5].

Теплопроводность тоже может ускорить термическое разрушение и воспламенение текстильных материалов теплозащитной спецодежды и привести к термическим ожогам спасателя. Материалы такой одежды должны иметь высокое удельное тепловое сопротивление. Существует множество примеров негорючих материалов с высоким КИ, но крайне низкими теплоизоляционными свойствами. Применение таких материалов востребовано в технике, где рассеивание избыточной теплоты имеет определенное значение (например, тормозные механизмы или чехлы самолетных кресел), но недопустимо в специальной защитной одежде спасателей.

Для выбора материалов эффективной противотепловой спецодежды необходимо руководствоваться не отдельно взятыми эксплуатационными характеристиками того или иного волокна (ткани), а рассматривать в комплексе их огнестойкие, теплостойкие и теплозащитные свойства.

Одновременно огнестойкостью и теплостойкостью обладает лишь немногочисленная группа волокон из числа хорошо известных специалистам ароматических полиарамидов (см. табл. 2). Именно эти волокна наиболее подходят для материалов теплозащитной спецодежды.

Высокомодульные параарамидные волокна широко известны своим применением для изготовления средств баллистической защиты. Однако из-за невозможности их окрашивания параарамиды в чистом виде не применяются для изготовления промышленной специальной защитной одежды. Для изготовления эффективной и комфортной противотепловой спецодежды наиболее подходят метаарамидные волокна или их композиции с параарамидами. Эти волокна не только огнестойкие и теплостойкие, но и отличаются от аналогов вдвое большим удельным тепловым сопротивлением, поэтому обеспечивают эффективную тепловую защиту и не поддерживают горения на воздухе. Арамидные волокна не плавятся и имеют низкую термическую усадку. Высокие огнестойкие и термостойкие свойства арамидных волокон обеспечивают максимальную их стойкость к воздействию повышенных температур.

Исходя из требований нормативных документов материал верха – наружный слой пакета материалов и тканей, используемых для изготовления противотепловой спецодежды, должен иметь металлизированное покрытие с высокой степенью отражения инфракрасного излучения и обеспечивать защиту от высоких температур окружающей среды и открытого пламени [3, 4].

В зарубежной практике широкое применение получило нанесение на материал верха алюминиевой фольги, что позволяет отражать до 96 % падающего теплового потока. Однако, как показала практика применения таких композиций, из-за невысокой механической прочности фольги спецодежда превращается в одежду одноразового применения. Пленка, получаемая методом напыления алюминиевого покрытия на материал верха, позволяет отражать до 90 % падающего теплового потока, но при этом обладает требуемой механической прочностью.

В качестве теплоизоляционной подкладки – слоя, который входит в состав пакета материалов противотепловой спецодежды и предназначен для защиты от конвективного теплообмена, используют материалы, обладающие низкой теплопроводностью (табл. 3).

Таблица 3

Сравнительные характеристики волокон

№ п/п	Параметр	Стекло-волокно	Минеральное	Базальтовое (БСТВ)
Механические характеристики				
1.	Кажущаяся плотность, кг/м ³	12...25	25...40	15...23
2.	Диаметр элементарного волокна, мкм	4...12	4...10	1...3
3.	Длина волокон, мм	15...50	16	40...70
4.	Модуль упругости, МПа	До 0,72	0,54...0,80	0,91...1,1
5.	Коэффициент уплотнения при эксплуатации	1,6	1,8	1,2
6.	Остаточная прочность при растяжении (после термообработки), %:			
	при температуре 20° С	100	100	100
	200 °С	92	95	98
	400 °С	52	60	85
	600 °С	Спекание	20	76
Температурные характеристики				
7.	Диапазон температур применения, °С	-60...+250	-180...+450	-250...+700
8.	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,038...0,04 2	0,04...0,04 7	0,031..0,034
9.	Температура спекания, °С	600	850	1100
Виброустойчивость (потеря массы при вибровоздействии), % ($v = 50$ Гц, $A = 1$ мм, $t = 3$ ч)				
10.	при температуре 200 °С	12	40	
	450 °С	41	75	0,01
	900 °С	100	100	0,35
Химическая устойчивость (потеря массы), %				
11.	в воде	6,2	4,5	1,6
	в щелочной среде	6	6,1	2,75
	в кислотной среде	38,9	24	2,2
12.	Водопоглощение за 24 ч, %	1,7	0,95	0,02

Теплопроводность материала складывается из трех составляющих: теплопроводности твердой основы, теплопроводности воздушной среды и влаги, находящейся в пустотах материала, и передачи теплоты лучеиспусканием. Теплопроводность твердой основы как основная составляющая общей теплопроводности зависит от геометрии и ориентации волокон в пространстве.

Базальтовое волокно – волокнистый материал, получаемый из силикатных расплавов горных пород. Оно имеет природную формулу вулканических пород. Производимые из базальтового волокна изделия: базальтохолст, базальтовые маты, ткани, плиты, картон – отличаются химической и физической инертностью в отличие от искусственных материалов (стекло- и минеральных волокон).

Долговечность изоляции определяется виброустойчивостью. Именно высокая виброустойчивость базальтовых волокон исторически определила их первую область применения – аэрокосмический комплекс и судостроение.

В теплоизолирующих материалах всегда присутствует некоторое количество влаги в виде пара или жидкости. При определенных условиях пар может конденсироваться внутри материала. Вода имеет кислотную реакцию. Как видно из строки 11 табл. 3, стеклянные и минеральные волокна уступают по химической стойкости базальтовым в 2,5-3 раза для нормальных и щелочных сред и в 8-17 раз для кислотных. Водопоглощение базальтоволокна в 85 раз ниже, чем стекловолокна. Следовательно, разрушение стеклянных и минеральных волокон протекает значительно быстрее, чем базальтового.

Неоспоримое преимущество базальтового волокна в его длине и тонкости. В холсте волокна спутываются и держатся без связующего материала. Для транспортирования и придания базальтовому материалу «товарного вида» холст иногда простегивают нитью или обшивают тканью. В изделиях из стекловаты и минерального волокна всегда используют связующие для придания им формы, защиты от влаги, улучшения механических характеристик, повышения физико-химической стойкости (то есть для исправления свойств самих волокон). В качестве связующего в подавляющем большинстве случаев используются фенольные смолы (от 1,5 до 10% по массе изделия). Таким образом, базальтовые волокна, полученные из расплава базальта, а также близких к нему пород, без каких-либо добавок в виде синтетических веществ имеют неоспоримое преимущество перед стекло-минеральными волокнами. Тысячелетнее пребывание базальтовых пород на поверхности планеты обуславливает их химическую инертность.

Внутренний слой, входящий в состав пакета материалов и тканей, предназначен для обеспечения гигиенических свойств изделия. Он должен позволять легко убирать следы загрязнения и предохранять проникновение влаги, выделяемой спасателем в теплоизоляционную подкладку одежды.

Мембрана GORE-TEX – чрезвычайно тонкая, легкая, жаро- и холодостойкая (-250...+260 °С), чрезвычайно прочная и устойчивая к изломам

при сильных механических нагрузках мембрана, изготовленная на основе политетрафторэтилена (тефлона). Водостойкость ее позволяет выдерживать давление до 80 м водяного столба, износостойкость 200 ч непрерывной машинной стирки. Мембрана представляет собой тонкую гидрофобную пористую пленку. Она содержит 1,5 миллиарда микроскопических пор на квадратный сантиметр, при этом размеры пор в 20000 раз меньше капли воды, что не позволяет воде проникать через мембрану.

Прорезиненную ткань широко используют не только в быту, но и на производстве: главное качество ее – водонепроницаемость. Для производства прорезиненного текстиля применяют различные виды текстильного материала – синтетического, хлопкового и смешанного. Для каждого вида ткани существует свой температурный режим, который может достигать +150 °С.

Термостойкое белье – комплект летнего или зимнего белья из трикотажного полотна с применением термостойких волокон, используемый в комплекте с противотепловой спецодеждой и предназначенный для дополнительной тепловой защиты спасателя и впитывания его потовыделений. Белье термостойкое изготавливают из огнетермостойкого трикотажного полотна.

При выборе материалов для противотепловой спецодежды необходимо обращать внимание на механические характеристики материалов, чтобы, с одной стороны, они обеспечивали защиту спасателя от механических воздействий и были износостойкими и прочными, но с другой стороны – не обладали запредельной прочностью, позволяющей без труда захватить и травмировать спасателя движущимися машинами и механизмами.

Износоустойчивость ткани определяет срок службы противотепловой спецодежды. Ткань должна выдерживать большие механические нагрузки и отличаться устойчивостью к истиранию. Механические характеристики арамидных тканей превышают минимальные требования всех известных стандартов безопасности и технических регламентов даже после 50 циклов промышленной стирки/сушки при 75 °С, что гарантирует долговечность изделия.

Материалы противотепловой спецодежды необходимо особенно тщательно подбирать с соблюдением баланса защиты и комфорта. Профессиональная защитная одежда должна быть комфортной, независимо от уровня защиты, то есть не вызывать болевых или неприятных ощущений.

При рассмотрении вопроса стоимости тканей для изготовления противотепловой спецодежды необходимо учитывать вероятность реализации и тяжесть последствий для здоровья и жизни спасателя.

Таким образом, комплексный подход при выборе материалов для изготовления противотепловой спецодежды, учитывающий их механические, огнестойкие, теплостойкие и теплозащитные свойства применительно к конструктивным элементам защитной одежды, позволил установить

следующие сочетания материалов, обладающих наилучшими показателями: для верхнего слоя – арамидные ткани с алюминиевым напылением; для теплоизоляционного слоя – базальтовое волокно; для внутреннего слоя – мембрана GORE-TEX

Выводы. Существующая противотепловая спецодежда изношена физически и устарела морально, ее модернизацию целесообразно производить с использованием современных материалов с улучшенными физико-механическими свойствами.

С учетом конструктивных особенностей противотепловой спецодежды выполнен анализ требований, предъявляемых к материалам, которые используют для изготовления слоев последней. Эти материалы должны противостоять воздействию высоких и низких температур; видимого и ультрафиолетового излучения; химических, механических факторов; многократной чистке, стирке.

Применительно к многослойной конструкции противотепловой спецодежды наилучшими показателями обладают следующие сочетания материалов: для верхнего слоя – арамидные ткани с алюминиевым напылением; для теплоизоляционного слоя – базальтовое волокно; для внутреннего слоя – мембрана GORE-TEX.

Окончательный выбор материалов необходимо делать с учетом их технико-экономических показателей.

Список литературы / References

1. Иванников В.П., Ключ П.П. Справочник руководителя тушения пожара. – М.: Стройиздат, 1987. – 287 с.

Ivannikov, V.P., Klyus, P.P. (1987). *Spravochnik rukovoditelya tusheniya pozhara* [The handbook of the fire-fighting manager]. Moscow: Stroyizdat Publ., 287 p.

2. Астапенко В.М., Кошмаров Ю.А. Термогазодинамика пожаров в помещениях. – М.: Стройиздат, 1988. – 448 с.

Astapenko, V.M., Koshmarov, Yu.A. (1988). *Termogazodinamika pozharov v pomeshcheniyakh* [Thermogasdynamics of fires in rooms]. Moscow: Stroyizdat Publ., 448 p.

3. Булгаков Ю.Ф., Борщевский С.В., Марийчук И.Ф. Индивидуальная противогазотепловая защита. – Донецк: ДонНТУ, 2015. – 385 с.

Bulgakov, Yu.F., Borshchevskiy, S.V., Mariychuk, I.Ph. (2015). *Individual'naya protivogazoteplovaya zashchita* [Individual gas and heat protection]. Donetsk: DonNTU Press, 385 p.

4. Козлова Е.В. Проектирование теплоизоляционной спецодежды с повышенной эффективностью: автореф. дис. ...канд. техн. наук: 05.19.04 / Гос. ун-т технологии и дизайна. – Киев, 1993. – 19 с.

Kozlova, Ye.V. (1993). *Proyektirovaniye teploizolyatsionnoy spetsodezhdy s povyshennoy effektivnost'yu*. Diss. cand. tekhn. nauk: 05.19.04 [Designing of the heat-insulating working clothes with higher efficiency. Cand. tech. sci. diss.: 05.19.04]. *Gos. un-t tekhnologii i dizayna* [The State university of technology and design]. Kiev, 19 p.

5. Scott, R.A. (ed.) (2005). *Textiles for protection*. Woodhead Publishing Limited and CRC Press LLC, 42 p.

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 25.01.2016*

Gennadiy Vyacheslavovich Zav'yalov, scientific associate; the "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DNR; e-mail: zavvyalov57@mail.ua; 283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phone (+38062) 311-69-62

CHOICE OF MATERIALS FOR THE SPECIAL HEAT PROTECTIVE CLOTHING

Purpose. Estimation of the modern materials for their application by manufacture of the constructive elements of the special clothing for rescuers protecting against the influence of high temperatures.

Methods. Comparative analysis of the most probable hazardous factors of the fire influencing on the rescuer, demands of the normative documents to the special clothing of the rescuer protecting against the thermal influence, to the modern materials for its manufacture.

Results. Subject to the constructive peculiarities of the special clothing of the rescuer protecting against the influence of the high temperatures and to demands made to the constructive elements the choice of the materials possessing the best characteristics was founded.

Scientific novelty. By the choice of the materials for manufacture of the special clothing for the rescuers protecting against the influence of the high temperatures the complex approach that permits to take into account their mechanical, heat-reflecting and physical and chemical properties was used in conformity with the constructive elements of the protective clothing.

Keywords: *temperature; heat exchange; protective clothing; heat influences; rescuer; heat-reflecting properties.*

УДК 621.96-514.1-82: 624.071.3

Георгий Иванович Пештибай, нач. отд.; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru; Александр Витальевич Чапкович, науч. сотр.; e-mail: niigd.osmas-2@mail.ru; Юрий Владимирович Богатырев, инж. I кат.; e-mail: niigd.osmas@mail.ru; Наталья Анатольевна Выпирайло, техник I кат.; e-mail: 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. (+38062) 311-71-29; 311-12-00

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ РАЗРЕЗАНИЯ СТРОИТЕЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

Цель. Определение основных параметров гидравлического инструмента для разрушения строительной арматуры.

Методы. Теоретические исследования способов разрушения металлических стержней, лабораторные испытания экспериментальных образцов гидроцилиндров с различными углами заострения резцов.

Результаты. Определены основные параметры гидравлического инструмента для разрушения металлических стержней диаметром до 20 мм.

Практическая значимость. Разработка и внедрение гидравлического инструмента для разрушения металлических стержней позволит значительно сократить время, повысить эффективность и безопасность ведения аварийно-спасательных работ при отсутствии стационарных источников энергии.

Ключевые слова: *аварийно-спасательные работы; гидравлический инструмент; арматура; усилие разрушения; резцы; гидроцилиндр.*

Постановка проблемы. Работы по ликвидации последствий аварий зачастую выполняют в условиях, ограничивающих возможность применения ряда приспособлений, инструментов и оборудования. Выполнение работ в условиях отсутствия стационарных источников энергопитания, в ограниченном пространстве, в условиях взрывоопасной окружающей среды делает невозможным использование тяжелой техники, оборудования и инструментов, работа которых предполагает применение открытого пламени и высоких температур. В подобных условиях целесообразно использование переносного гидравлического инструмента, оснащенного автономным источником энергопитания. Небольшие габариты позволяют применять его в ограниченном пространстве. При работе составные узлы и детали гидроинструмента не накапливают статическое электричество, приводящее к искрообразованию, что позволяет использовать его в условиях взрывоопасных сред. В мировой практике гидравлический инструмент широко применяют при ликвидации последствий аварий любой степени сложности, практически в любых условиях. Гидравлический инструмент разрабатывают и изготавливают во многих странах мира, наиболее известны такие производители, как Holmatro (Голландия), «Энерпред» (Россия), Hi-Force (Англия), Lukas (Германия), Enerpac (США) и другие, что свидетельствует о востребованности и практической значимости этого оборудования.

НИИГД «Респиратор» имеет многолетний опыт создания гидравлических инструментов [1], которые широко используют спасатели при ликвидации последствий аварий. Однако современные условия требуют создания более эффективных гидроинструментов с расширенными функциональными возможностями.

При полном разрушении инженерной инфраструктуры современного здания, частичном или полном разрушении несущих конструкций и перекрытий, приводящих к завалам и повреждению внутренних коммуникаций, использование стационарных источников энергии, применение крупногабаритной техники, электроинструмента и газорезущего оборудования становится невозможным. В таких условиях для ликвидации последствий аварии возникает необходимость в использовании компактного переносного гидравлического инструмента, оснащенного автономным источником энергопитания. НИИГД «Респиратор» ведет научно-исследовательскую работу по созданию комплекса средств малой механизации, в состав которого должно входить устройство, предназначенное для разрезания строительной арматуры наиболее распространенных диаметров.

Цель работы. Определение основных параметров гидравлического инструмента для разрушения строительной арматуры.

Материал исследования. Современные строительные технологии предполагают широкое применение железобетонных конструкций при возведении зданий и сооружений промышленного и гражданского назначения. Для армирования железобетонных конструкций применяют строительную арматуру. Строительная арматура разделяется на арматуру с гладким и периодическим профилем (имеет на поверхности профиля рифление, которое расположено под углом к продольной оси). Строительную арматуру обозначают индексом «А», она подразделяется на 6 классов (в зависимости от толщины и марки стали). В современном строительстве при создании большинства железобетонных конструкций используют рифленую арматуру диаметром 12...20 мм.

При механическом разрезании металлических стержней применяют два способа деформации. Первый способ – это деформация сдвига, второй – деформация растяжения. Способ деформации сдвига предполагает полное пересечение режущими элементами диаметра разрушаемого образца, способ деформации растяжения предполагает сдавливание режущими элементами разрушаемого образца до достижения предела текучести материала.

При способе резки металлических стержней с использованием деформации сдвига (рис. 1) усилие резания P_{cp} , H , стержня равно

$$P_{cp} = \left(\frac{\pi d^2}{4} - 2S_c \right) \tau_{cp}, \quad (1)$$

где d – диаметр стержня, м;

S_c – площадь сегмента, образующегося при внедрении резца в стержень, м²;

τ_{cp} – разрушающее напряжение сдвига, Н/м².

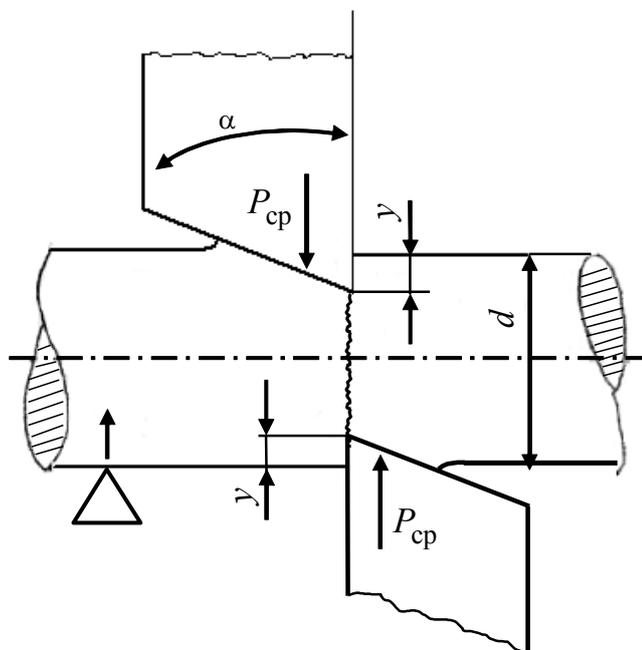


Рис. 1. Схема разрушения стержней деформацией сдвига

Площадь сегмента S_c , м², с некоторым приближением равна

$$S_c = \frac{2}{3} dy, \quad (2)$$

где y – стрелка сегмента, м.

$$\tau_{cp} = 0,6\sigma_p, \quad (3)$$

где σ_p – разрушающее напряжение растяжения, Н/м².

Из формул (2), (3) получим

$$P_{cp} = \left(\frac{\pi d^2}{4} - \frac{4}{3} dy \right) 0,6\sigma_p, \quad (4)$$

где σ_{cm} – напряжение смятия, Н/м²;

α – угол заострения резца, ...°.

Усилие сжатия $P_{см}$, Н, на контакте резца со стержнем равно

$$P_{см} = \sigma_{см} \frac{S_c}{\cos \alpha}. \quad (5)$$

Принимая $\sigma_{см} = \frac{2}{3} \sigma_p$ и $\alpha = 60^\circ$, из формул (2) и (5) получим

$$P_{см} = 0,89 d y \sigma_p. \quad (6)$$

Разрушение стержня произойдет при условии

$$P_{см} = P_{ср}. \quad (7)$$

По формулам (4), (6) и (7) определим глубину внедрения резцов y , м, при которой стержень разрушится:

$$y = 0,28 d. \quad (8)$$

По формулам (4) и (8) получим

$$P_{ср} = 0,25 d^2 \sigma_p. \quad (9)$$

При резке стержней вторым способом деформацию растяжения создает усилие Q , Н (рис. 2,а), связанное с усилием резания P_p соотношением, полученным из треугольника сил (рис. 2,б):

$$Q = P_p \operatorname{tg} (\alpha + \rho), \quad (10)$$

где ρ – угол трения, ...°.

Стержень разрушится, когда напряжение растяжения в сечении достигнет предельных значений.

$$Q = \left(\frac{\pi d^2}{4} - 2S_c \right) \sigma_p. \quad (11)$$

Из формул (2) и (11) получим

$$Q = \left(\frac{\pi d^2}{4} - \frac{4}{3} dy \right) \sigma_p. \quad (12)$$

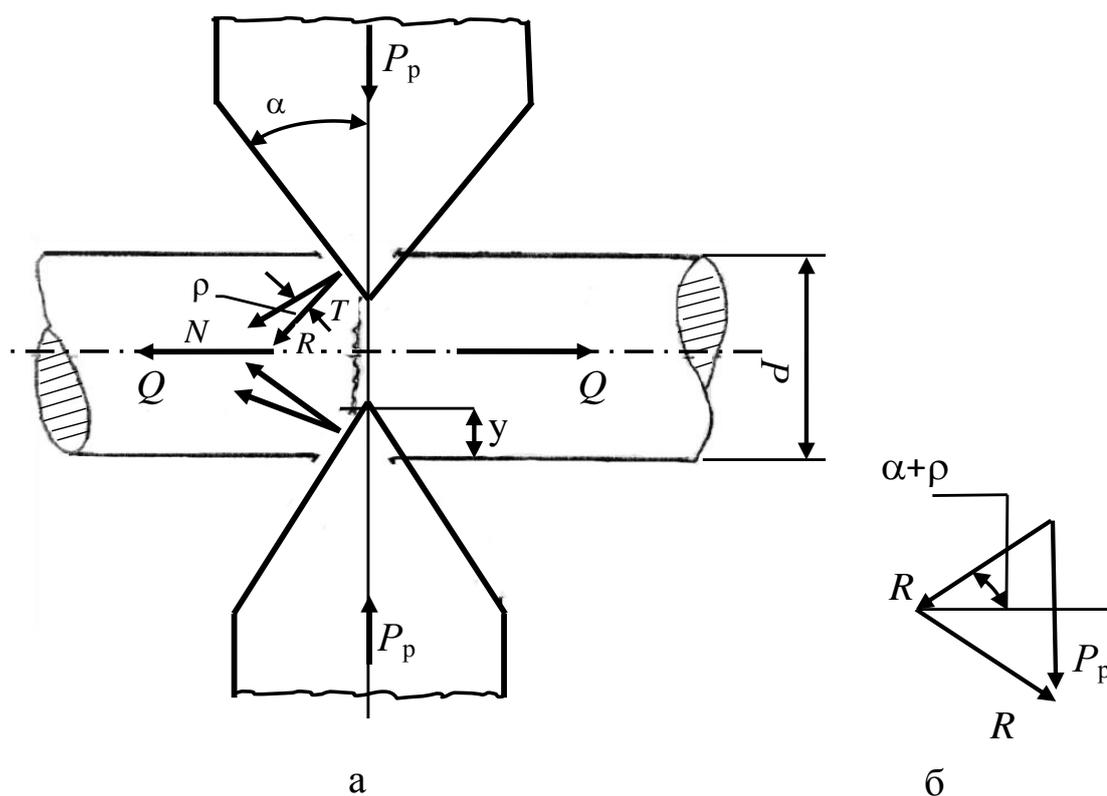


Рис. 2. Схема разрушения стержней деформаций растяжения:
а – схема приложения усилий; б – условие равновесия

Для определения разрушающих усилий Q и P_p необходимо произвести расчет глубины внедрения «у» резцов в стержень в момент его разрушения. Глубина внедрения определяется площадью контакта стержня с клиновыми поверхностями резцов и напряжениями смятия на этих поверхностях. Напряжение смятия создает усилие N , Н:

$$N = \sigma_{\text{см}} \frac{S_c}{\cos \alpha}. \quad (13)$$

С учетом того, что $Q = N \cos \alpha$; $S_c = \frac{2}{3} dy$ и $\sigma_{\text{см}} = \frac{2}{3} \sigma_p$, по формуле (13) получим

$$Q = \frac{4}{9} \sigma_p d y. \quad (14)$$

По формулам (12) и (14) определим глубину внедрения резца y , мм:

$$y = 0,441 d. \quad (15)$$

По формулам (10), (12) и (15) определим усилие резания P_p , Н, при $\alpha = 30^\circ$ и $\rho = 3^\circ$ (коэффициент трения стали о сталь $f_{тр} = 0,06$) [2]:

$$P_p = 0,3d^2\sigma_p. \quad (16)$$

Сравним усилия резания P_p и $P_{ср}$. По формулам (9) и (16) получим

$$P_p / P_{ср} = 1,2. \quad (17)$$

Таким образом, усилие на резцах при разрушении способом деформации сдвига на 20 % меньше, чем при разрушении способом деформации растяжения.

Расчеты позволили провести сравнительный анализ усилий при разрезании металлических стержней различными способами. На рис. 3 представлены графически формулы (9) и (16) для стержней диаметром 16, 20 и 25 мм из сталей с пределом прочности на растяжение 40...80 МПа.

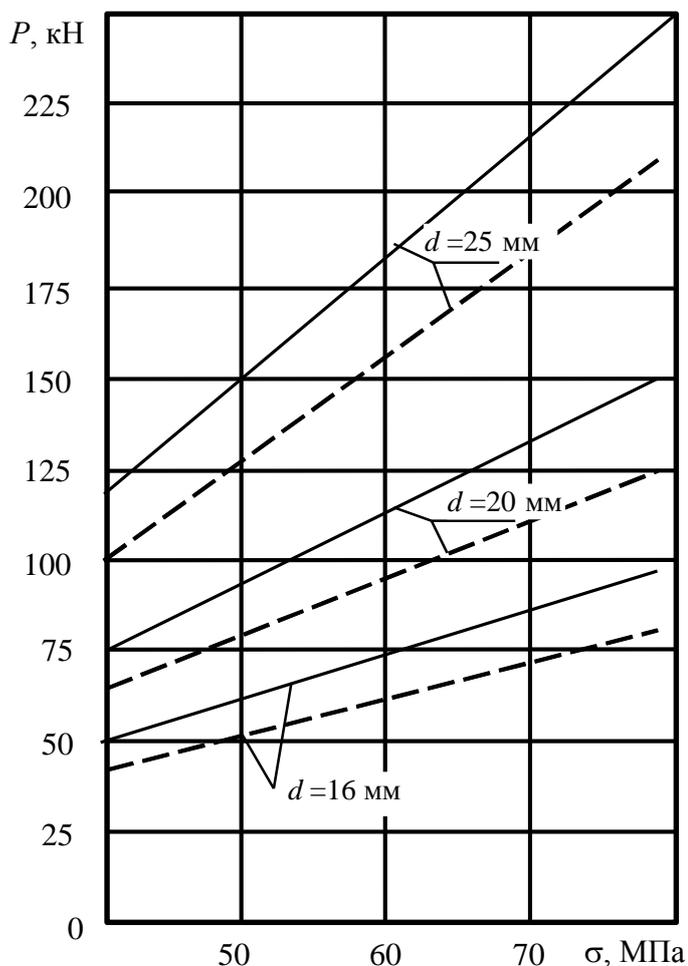


Рис. 3. Усилия резания при разрушении стержней способами деформаций сдвига и растяжения:

----- – сдвиг; ———— – растяжение; d – диаметр стержня

С целью получения исходных данных для определения основных параметров устройства для разрезания строительной арматуры проведены экспериментальные исследования с применением двух гидроцилиндров с диаметрами поршней 110 и 105 мм. При проведении испытаний использовали резцы с углом заострения 90° и двойным углом заострения $90^\circ/60^\circ$ соответственно (рис. 4 и 5). Исследования проводили для определения влияния угла заострения резца на усилие резания металлических стержней. Разрушали образцы способом деформации растяжения. В качестве разрушаемых образцов выбраны следующие материалы: строительная арматура А-2 Ст5 диаметром 12, 16, 18, 20 мм; квадрат Ст3 16 мм; круг Ст3 диаметром 22 мм [3]; цепь круглозвенная диаметром 24 и 26 мм.



Рис. 4. Резец с углом заострения 90°



Рис. 5. Резец с двойным углом заострения $90^\circ/60^\circ$

Разрезали каждый вид материала не менее 3 раз, в расчет принимали среднее арифметическое значение. Выбор вида разрезаемого материала для каждого из гидроцилиндров обусловлен их конструктивными особенностями. Рабочий ход поршней гидроцилиндров зафиксирован в пределах 26...33 мм (табл. 1 и 2).

Таблица 1

Усилие разрушения материалов при помощи гидроцилиндра 1
(поршень диаметром 110 мм, угол заострения резцов 90°)

Разрушаемый материал	Арматура Ст5 Ø, мм				Квадрат Ст3, мм	Круг Ст3 Ø, мм
	12	16	18	20		
Давление в гидроцилиндре P , МПа	8	11	14	18	10	21
Усилие разрушения Q , Н	75988	104483	132979	170973	94985	199468

Таблица 2

Усилие разрушения материалов при помощи гидроцилиндра 2 (поршень диаметром 105 мм, угол заострения резцов 90°/60°)

Разрушаемый материал	Арматура Ст5 Ø, мм		Квадрат Ст3, мм	Круг Ст3 Ø, мм	Цепь Ø, мм	
	18	20	16	22	24	26
Давление в гидроцилиндре P , МПа	16	18	10	20	38	48
Усилие разрушения Q , Н	138474	155783	86546	173092	328875	415421

Усилия разрушения Q , Н, определены расчетным путем по формуле [4]

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} P, \quad (18)$$

где D – диаметр поршня, мм;

P – давление рабочей жидкости в гидроцилиндре, МПа.

Результаты исследований показали, что при использовании резцов с двойным углом заострения (90°/60°) усилия разрушения металлических стержней диаметром 20 и 22 мм меньше. Преобразуя формулу (18), получаем выражение для определения диаметра поршня D , мм, разрабатываемого устройства:

$$D = 2 \sqrt{\frac{Q}{P\pi}}. \quad (19)$$

Полученные при проведении эксперимента значения усилий увеличили на коэффициент запаса $n = 1,1$ и рассчитали необходимый диаметр поршня устройства для разрушения металлических стержней указанных диаметров при различных давлениях в гидросистеме (табл. 3).

Таблица 3

Расчетный диаметр поршня D , мм

Рабочее давление P , МПа	Для разрушения арматуры Ø, мм	
	20	22
50	69	75
60	63	68
70	59	63

Выводы

1. Проведенные аналитические и экспериментальные исследования позволяют определить основные параметры устройства для разрушения металлических стержней.
2. Для разрушения строительной арматуры диаметром до 20 мм необходимо приложить усилие не менее 180 кН.
3. При рабочем давлении 50...70 МПа достаточно будет значения диаметра поршня гидроцилиндра в пределах 60...75 мм, рабочий ход должен быть не менее 30...35 мм.
4. При разработке устройства для разрезания строительной арматуры следует учесть возможность применения различных типов резцов (с использованием деформации сдвига и растяжения). Однако при использовании резцов для разрезания металлических стержней способом деформации сдвига необходимо предусмотреть дополнительный конструктивный элемент, ограничивающий разворот разрушаемого металлического стержня в процессе резания.
5. Создание и внедрение вышеописанного гидравлического инструмента приведет к сокращению времени ведения аварийно-спасательных работ, снизит трудоемкость, повысит эффективность и безопасность работ.

Список литературы / References

1. Каледин Н.В, Педтибай Г.И., Медгаус В.М. Средства малой механизации для горноспасателей и горняков // Уголь Украины. – 2003. – № 1. – С. 48 – 50.
Kaledin, N.V., Peftibay, G.I., Medgaus, V.M. (2003). *Sredstva maloy mekhanizatsii dlya gornospasateley i gornyakov* [Rigging for mine rescuers and mine workers]. *Ugol' Ukrainy*, no. 1, pp. 48 – 50.
2. 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]. 3rd rev. and suppl. ed. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., vol. 1, 731 p.
3. Марочник сталей и сплавов / под ред. А.С. Зубченко. – М.: Машиностроение, 2001. – 672 с.
Zubchenko, A.S. (ed.) (2001). *Marochnik staley i splavov* [Brand handbook of steels and alloys]. Moscow: Mashinostroyeniye Publ., 672 p.

4. Галдин Н.С. Основы гидравлики и гидропривода: учебное пособие / Н.С. Галдин. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2006. – 127 с.

Galdin, N.S. (2006). *Osnovy gidravliki i gidroprivoda* [Fundamentals of hydraulics and hydraulic actuator]. Omsk: SibADI Publ., 127 p.

Рекомендовано к публикации канд. техн. наук В.Г. Богатыревым.
Дата поступления рукописи 25.01.2016

Georgiy Ivanovich Pefibay, head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru; *Aleksandr Vital'yevich Chapkovich*, scientific associate; e-mail: niigd.osmas-2@mail.ru; *Yuriy Vladimirovich Bogatyryev*, engineer of the first category; e-mail: niigd.osmas@mail.ru; *Natalya Anatol'yevna Vypiraylo*, technician of the first category; e-mail: 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 311-71-29; 311-12-00

PRINCIPAL PARAMETERS OF THE DEVICE FOR CUTTING-OFF THE BUILDING REINFORCEMENT

Purpose. Determination of principal parameters of the hydraulic instrument for destruction of the building reinforcement.

Methods. Theoretical investigations of the methods of destruction of iron cores, laboratory tests of experimental specimens of hydraulic cylinders with various tool angles.

Results. The principal parameters of the hydraulic instrument to destruct the iron cores with a diameter up to 20 mm were determined.

Practical value. The development and introduction of the hydraulic instrument to destruct the iron cores will permit to shorten the time considerably, to raise the efficiency and safety of carrying-out the emergency and rescue operations when the stationary energy sources are not available.

Keywords: *emergency and rescue operations; hydraulic instrument; reinforcement; destruction force; cutters, hydraulic cylinder.*

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 ранее 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, звании, должности, месте работы, 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 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

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

Все принятые к печати статьи обязательно рецензируются

Подписано к использованию 29.02.2016.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38062) 311-69-52; 311-31-47

Объем 6,70 Мб

E-mail: niigd@mail.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата публикации выпуска 1 марта 2016 г.

АСПИРАНТУРА
НИИГД «Респиратор»

Контакты:

тел. +38(062)311-69-52

факс (062)311-69-43

e-mail: 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