



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

№ 4 (53)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2016

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 4 (53). – 114 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.

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

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

Утверждено к печати решением ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 8 от 29.09.2016).

Редакционная коллегия:

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

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

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. 4 (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. 4 (53). – 114 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergencies, of anthropogenic safety, prevention and fighting the fires at the mines, creation of the mine-rescue equipment, life-saving the people by underground accidents are expounded.

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

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

Approved for printing according to the decision of the academic council of the NIIGD “Respirator” (proceeding no.8 from 29.09.2016).

Editorial board:

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

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

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

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

- Кострубицкий А.А., Агеев В.Г.**
Моделирование испарения капель
жидкости в зоне действия пожара
7
- Богомаз А.М., Дикенштейн И.Ф.**
Снижение задымленности в помещении
при подаче воздушно-водяной смеси
15
- Греков С.П., Пашковский П.С.,
Всякий А.А., Орликова В.П.**
Универсальный комплексный
показатель эндогенной
пожароопасности органических веществ
24
- Мамаев В.В., Артёмова А.Ю.**
Температура воспламенения шахтных
горючих материалов
37
- Козлитин А.А., Лебедева В.В.,
Непочатых И.Н.** Развитие пожара от
источника зажигания малой мощности
43

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

- Карнаух Н.В., Мавроди А.В.**
Расчет температуры пожарных газов
за очагом пожара
52
- Орликова В.П., Глушенко К.В.,
Волынец В.В.** Реакционная активность
органических веществ
58
- Момот Д.И.** Определение
технологических параметров получения
газомеханической пены на сетках
69

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

- Kostrubitskiy A.A., Ageyev V.G.**
Modeling of evaporation of drops of liquid
in the coverage of the fire
7
- Bogomaz A.M., Dikenshteyn I.F.**
Reduction of smoke content in premises
by supply of the air-water mixture
15
- Pashkovskiy P.S., Grekov S.P.,
Vsyakiy A.A., Orlikova V.P.**
The universal complex index
of the spontaneous fire hazard of organic
substances
24
- Mamayev V.V., Artyemova A.Yu.**
The ignition temperature of mine
combustible materials
37
- Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.,
Nepochatykh I.N.** Causes of development
of a fire from a low-power ignition source
43

II. Safety in emergencies

- Karnaukh N.V., Mavrodi A.V.**
Calculation of temperature of fire gases
outside the seat of fire
52
- Orlikova V.P., Hlushenko Ch.V.,
Volynets V.V.** Reactionary activity of
organic substances
58
- Momot D.I.** Determination of technological
parameters of generation of the gas
mechanical foam on nets
69

Бубела М.Н. Удаление выхлопных газов из подземных автостоянок

77

Bubela M.N. Removal of exhaust gases from underground parking garages

III. Охрана труда

Пeftибай Г.И., Галухин Н.А., Чайковская Э.Г.
Математическое описание переходных процессов в системе «насос – пожарный рукав – ствол»

84

Peftibay G.I., Galukhin N.A., Chaykovskaya E.G.
The mathematical description of transient processes in the system “pump – fire hose – fire-hose barrel”

Завьялов Г.В. Параметры водяного охлаждения противотеплового костюма спасателя

93

Zav'yalov G.V. Parameters of the water cooling of the heat protective suit of the rescuer

Добрякова Е.И. Психологические аспекты поведения людей в условиях пожара

102

Dobryakova Ye.I. Psychological aspects of behaviour of the people under fire conditions

Требования к оформлению статьи

112

Requirements of execution of an article

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 614.842.612:001.891.572

Алексей Александрович Кострубицкий, министр; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

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

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

Владимир Григорьевич Агеев, канд. техн. наук, директор; e-mail: niigd@mail.ru;

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

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

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПАРЕНИЯ КАПЕЛЬ ЖИДКОСТИ В ЗОНЕ ДЕЙСТВИЯ ПОЖАРА

Цель. Моделирование интенсивности испарения капель жидкости в зависимости от температуры очага пожара после распада прерывистых струй.

Методика основана на использовании математической модели нестационарного процесса испарения капель жидкости в зоне действия пожара.

Результаты. Предложена математическая модель на основе классических уравнений взаимодействия двухфазных потоков (жидкость и пар). Получены аналитические зависимости интенсивности испарения капель жидкости от их диаметров и температуры очага пожара.

Научная новизна. Результаты исследования закономерностей испарения и перехода жидкости в пар позволяют повысить эффективность системы водяного пожаротушения.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при выборе параметров пожарного водомёта и оценке эффективности воздействия диспергированной воды на очаг пожара.

Ключевые слова: *прерывистая струя; жидкость; пар; капли жидкости; температура; масса жидкости; масса пара; аналитическая зависимость.*

Постановка проблемы. Успех борьбы с пожарами зависит от фундаментального научного и экспериментального подхода при изучении динамики их развития и тушения в помещениях. Важно не только изучение динамики развития пожаров в помещениях, но особенно борьбы с ними различными веществами, одно из которых – диспергированная вода.

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), они, по сути, не затрагивают процессов непосредственного тушения пожаров в зоне горения [1, 2]. Это не даёт возможности моделировать различные варианты пожаротушения, а также научно обоснованно выбирать места установки средств пожаротушения и прогнозировать их производительность.

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

Цель исследований. Моделирование интенсивности испарения капель жидкости в зависимости от их диаметров и температуры в очаге пожара.

Материалы и результаты исследований. При разработке математической модели воздействия на очаг пожара прерывистыми или непрерывными струями будем предполагать, что в очаг пожара периодически попадает диспергированная после распада струй жидкость с определённым диаметром капель и первоначальной скоростью их движения. Таким образом, в очаге пожара образуется двухфазный поток смеси воздуха с жидкостью в виде капель, которая будет испаряться под воздействием высоких температур.

Для описания взаимодействия фаз вещества используем уравнения сохранения массы воздуха и капель жидкости. Будем считать, что тепловое взаимодействие фаз вещества является доминирующим по сравнению с механическим, в силу чего последним можно пренебречь и считать скорости движения капель жидкости примерно совпадающими со скоростью вентиляционного потока.

Введём в рассмотрение такие понятия, как масса фазы вещества m , кг, и массовый расход фазы вещества G , кг/с, в очаге пожара. Тогда с соответствующими индексами систему уравнений сохранения массы каждой фазы вещества можно представить в виде [3]

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{d\tau} = G_{10} - G_1 - kV; \\ \frac{dm_2}{d\tau} = G_{20} - G_2 - kV, \end{cases} \quad (1)$$

где m_1 – масса воздуха вместе с паром, кг;

τ – время, с;

G_{10} – расход воздуха перед очагом пожара, кг/с;

G_1 – расход воздуха вместе с паром, кг/с;

k – скорость фазовых переходов при испарении жидкости или конденсации паров, кг/(с·м³);

V – объём части очага пожара, на которую воздействуют струи жидкости, м³;

m_2 – масса капель жидкости, кг;

G_{20} – расход воды перед очагом пожара, кг/с;

G_2 – расход воды, кг/с.

Скорость фазовых превращений, в данном случае – скорость испарения, может быть определена по формуле [4]

$$k = \frac{6\beta\varphi_2 P}{d_k} \left[\frac{1}{(2\pi R T_1)^{1/2}} - \frac{1}{(2\pi R T_2)^{1/2}} \right], \quad (2)$$

где β – коэффициент испарения;
 φ_2 – объёмная доля капель жидкости;
 P – статическое давление, Па;
 d_k – средний диаметр капель жидкости, м;
 R – универсальная газовая постоянная, м²/(с²·К);
 T_1 – абсолютная температура воздуха, К.
 Эту формулу можно преобразовать:

$$k = \frac{6\beta\varphi_2 P}{d_k (2\pi R T_2)^{1/2}} \left[(T_2 / T_1)^{1/2} - 1 \right]. \quad (3)$$

Будем считать, что статическое давление меняется незначительно, и выразим концентрацию жидкой фазы вещества через её расход. Тогда вместо предыдущей формулы получим

$$k = \frac{6\beta P m_2}{\rho_2 V d_k (2\pi R T_2)^{1/2}} \left[(T_2 / T_1)^{1/2} - 1 \right]. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что если температура воздуха выше температуры капель жидкости, то последняя испаряется. В этом случае скорость отрицательна и согласно уравнениям (1) масса воздуха за счёт пара будет увеличиваться, а масса воды уменьшаться и тем интенсивнее, чем меньше диаметр капель жидкости.

Между массой и массовым расходом фаз вещества существует зависимость вида

$$G = m \frac{vS}{V}, \quad (5)$$

где v – скорость движения пара и капель жидкости, м/с.

Входящий в формулы (3) и (4) диаметр капель жидкости можно определить через массовый расход жидкой фазы вещества:

$$G_2 / G_{20} = \frac{n\rho_2 \pi d_k^3}{n\rho_2 \pi d_{k0}^3}, \quad (6)$$

это позволило получить формулу для расчёта диаметров капель жидкости в любое время с момента их образования:

$$d_k = d_{k0}(G_2/G_{20})^{1/3}, \quad (7)$$

где n – количество капель жидкости в заданном объёме;

d_{k0} – первоначальный диаметр капель после распада прерывистой струи, м.

Из формулы (7) следует, что с уменьшением массового расхода жидкой фазы вещества в результате испарения уменьшается диаметр капель и наоборот.

Используя равенство (5) с соответствующими индексами, представим систему уравнений (1) в виде

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{d\tau} = G_{10} - \frac{\upsilon S}{V} m_1 - kV; \\ \frac{dm_2}{d\tau} = G_{20} - \frac{\upsilon S}{V} m_2 + kV. \end{cases} \quad (8)$$

Представим формулу (4) для скорости испарения в общем виде:

$$k = -f(\tau)m_2/V, \quad (9)$$

где функция f связана с температурой и диаметрами капель и равна

$$f(\tau) = \frac{6\beta P}{\rho_2 d_k (2\pi RT_2)^{1/2}} \left[1 - (T_2/T_1)^{1/2} \right]. \quad (10)$$

Подставляя выражение (9) в уравнения системы (8), получим

$$\begin{cases} \frac{dm_1}{d\tau} = G_{10} - \frac{\upsilon S}{V} m_1 + f(\tau)m_2; \\ \frac{dm_2}{d\tau} = G_{20} - \frac{\upsilon S}{V} m_2 - f(\tau)m_2. \end{cases} \quad (11)$$

Как начальные условия для уравнений этой системы примем, что в начальное время известны в рассматриваемом объёме масса воздуха и масса воды, поданной импульсной струей мгновенно:

$$m_1(0) = m_{10}; \quad m_2(0) = m_{20}. \quad (12)$$

При этом считаем, что вода в зону горения не поступает до нового её вбрасывания. Поэтому примем $G_{20} = 0$.

Для описания характера воздействия на очаг пожара импульсных струй будем искать аналитическое решение задачи в первом приближении, полагая

$$f(\tau) = f_0 = \frac{6\beta P}{\rho_2 d_{k0} (2\pi R T_{20})^{1/2}} \left[1 - (T_{20}/T_{10})^{1/2} \right]. \quad (13)$$

С учётом вышеизложенного второе уравнение системы (11) примет вид

$$\frac{dm_2}{d\tau} = G_{20} - \frac{vS}{V} m_2 - f_0 m_2. \quad (14)$$

Считая скорость движения каплей жидкости известной величиной, решение уравнения (14) со вторым начальным условием (12) представим в виде

$$m_2(\tau) = m_{20} \exp \left[- \left(\frac{vS}{V} + f_0 \right) \tau \right]. \quad (15)$$

Подставим полученное решение (15) в первое уравнение системы (11) и будем иметь

$$m_1(\tau) = m_{10} + m_{20} \exp \left(- \frac{vS}{V} \tau \right) \left[1 - \exp(-f_0 \tau) \right]. \quad (16)$$

Из анализа зависимости следует, что чем больше скорость испарения, тем быстрее увеличивается масса воздуха в результате испарения каплей жидкости. Вместе с тем за счёт вентиляции масса пара в воздухе будет при этом уменьшаться в зоне горения.

Представим полученные зависимости (15) и (16) в безразмерном виде, введя в рассмотрение относительную массу воздуха и влаги:

$$\bar{m}_1 = m_1 / m_{10}; \quad \bar{m}_2 = m_2 / m_{10},$$

а также относительную скорость испарения и кратность обмена воздуха в рассматриваемой зоне горения:

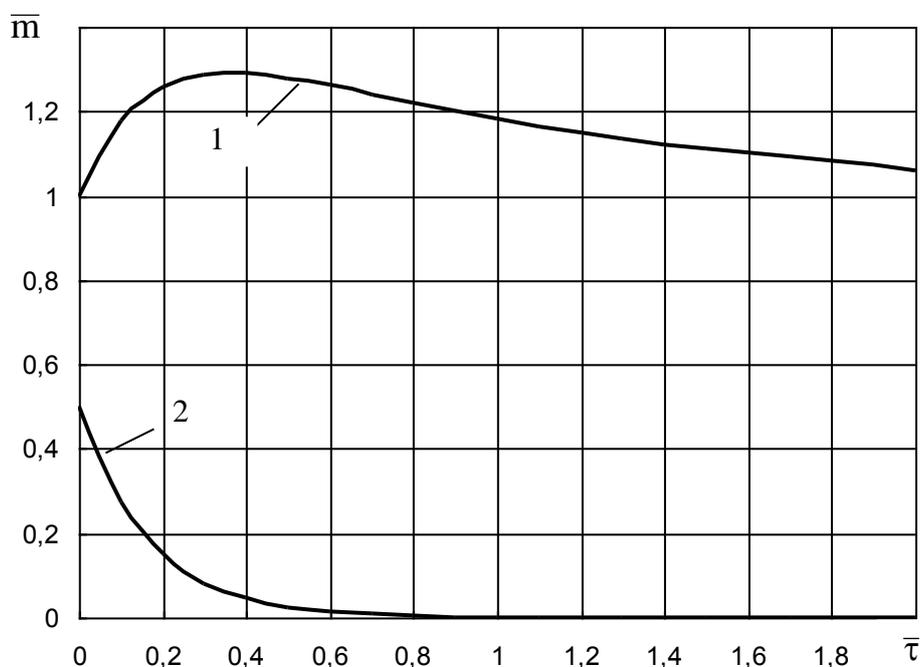
$$\bar{f}_0 = f_0 V / (v_1 S); \quad \tau = \frac{v_1 S}{V} \tau.$$

В результате формулы (15) и (16) примут вид

$$\left. \begin{aligned} \bar{m}_2(\tau) &= \bar{m}_{20} \exp\left[-(1 + \bar{f}_0)\bar{\tau}\right]; \\ \bar{m}_1(\tau) &= 1 + \bar{m}_{20} \exp(-\bar{\tau}) \left[1 - \exp(-\bar{f}_0 \bar{\tau})\right]. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

На рисунке представлены результаты расчёта по формулам (17) при значениях параметров $\bar{m}_{20} = 0,5$; $\bar{f}_0 = 5$, откуда видно, что при большой скорости испарения капли жидкости быстро переходят в пар, который вентиляционным потоком выносится из зоны горения.

Как показывают результаты моделирования (см. рисунок), несмотря на быстрое испарение, количество пара в вентиляционном потоке не достигает максимально возможного значения, соответствующего первоначальной массе воды, и составляет всего 60 %. Это связано с выносом капель воды из рассматриваемой зоны горения и с выносом пара.



Изменение относительной массы каплей жидкости при их испарении (2) и относительной массы воздуха (1)

Время, когда концентрация пара в потоке воздуха достигает максимального значения, составляет примерно половину кратности обмена воздуха в рассматриваемой зоне горения, после чего концентрация пара начинает снижаться. Так, при скорости вентиляционного потока $v = 2$ м/с, объёме зоны горения $V = 100$ м³ время достижения максимальной концентрации пара τ , с, будет

$$\tau = \frac{V}{2v_1 S} = 3 \text{ с.}$$

Поэтому для поддержания высокой концентрации пара в потоке воздуха или в пожарных газах промежутки между запусками импульсных струй должен быть, по данным примера, не менее 3 с.

Выводы. Таким образом, выполненные исследования интенсивности испарения капель жидкости в зависимости от их диаметров и температуры очага пожара, подтвержденные результатами математического моделирования, позволяют, используя полученные аналитические зависимости, определить время достижения максимальной концентрации пара и тем самым минимальной концентрации кислорода в очаге пожара.

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

Список литературы / References

1. Егоров, А.В. Гидравлические параметры импульсного водомёта // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1999. – С. 62 – 69.

Yegorov, A.V. *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, 1999, pp. 62 – 69.

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

Semko, A.N., Beskrovnaya, M.V., Vinogradov, S.A., Gritsyna, I.N. *Tusheniye gazovykh fakelov vysokoskorostnymi impul'snymi struyami* [Extinguishing the gas flares with fast pulse jets]. *Gornospasatel'noye delo, sb.nauch. tr. / NIIGD* [Proc. of the NIIGD “Mine-rescue work”]. Donetsk, 2013, issue 50, pp. 128 – 136.

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

Kutateladze, S.S. *Gidroninamika gazozhidkostnykh system* [Hydrodynamics of gas-liquid systems]. Moscow, Energiya Publ., 1976, 296 p.

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

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

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 29.08.2016

Alexey Aleksandrovich Kostrubitskiy, Minister, e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

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

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

Vladimir Grigor'yevich Ageyev, Cand. Sci. (Tech.), director; e-mail: niigd@mail.ru;

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

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

MODELING OF EVAPORATION OF DROPS OF LIQUID IN THE COVERAGE OF THE FIRE

Purpose. Modeling of intensity of evaporation of the drops of liquid depending on the temperature of the seat of fire after disintegration of the interrupted jets.

Methods. The methods are based on the mathematical model of the non-stationary process of evaporation of the drops of liquid in the coverage of the fire.

Results. The mathematical model on the basis of classical equations of interaction of the two-phase flows (liquid and steam) was proposed. The analytical dependences of intensity of evaporation of the drops of liquid on their diameters and temperature of the seat of fire were received.

Scientific novelty. The results of examination of regularities of evaporation and transfer of the liquid into the steam permit to increase the efficiency of the water fire-extinguishing system.

Practical value. The results received may be used by the choice of parameters of the fire water cannon and estimation of the efficiency of influence of the water dispersed on the seat of fire.

Keywords: *interrupted jet; liquid; steam; drops of liquid; temperature; mass of liquid; mass of steam; analytical dependence.*

УДК 614.842.612:[614.841.13:621.63]

Андрей Михайлович Богомаз, аспирант; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

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

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

СНИЖЕНИЕ ЗАДЫМЛЕННОСТИ В ПОМЕЩЕНИИ ПРИ ПОДАЧЕ ВОЗДУШНО-ВОДЯНОЙ СМЕСИ

Цель. Определение параметров подачи воздушно-водяной смеси при помощи дымососов в аварийное помещение для снижения задымленности.

Методы. Аналитические исследования процесса взаимодействия капель диспергированной воды с частицами дыма.

Результаты. Получена зависимость для расчета концентрации частиц дыма в аварийном помещении в зависимости от времени и интенсивности подачи воздушно-водяной смеси.

Научная новизна. Установлена зависимость дальности видимости в аварийном помещении в зависимости от параметров очага пожара (интенсивности дымообразования) и интенсивности подачи воздушно-водяной смеси.

Практическая значимость. Разработана методика расчета снижения задымленности при подаче в аварийное помещение распыленной воды с помощью переносных дымососов, имеющих на вооружении пожарно-спасательных сил МЧС ДНР. Это позволит определить необходимое время работы дымососа и расход воздушно-водяной смеси для обеспечения требуемой видимости и безопасности при ликвидации чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: *частицы дыма; дымоосаждение; дымососы; концентрация частиц; коэффициент захвата; расход воды.*

Постановка проблемы. Среди задач, связанных с разработкой и совершенствованием способов и средств противопожарной защиты объектов народного хозяйства, а также с повышением эффективности работы пожарных, вопросы борьбы с дымом занимают одно из основных мест [1]. Задымленность помещений и путей эвакуации при пожарах часто становится основной причиной гибели людей, потери материальных ценностей, значительно усложняет действия пожарно-спасательных подразделений. Здания повышенной этажности, гостиницы, больницы оборудуют системами противодымной защиты с различными вариантами приточно-вытяжной вентиляции. Однако в подавляющем большинстве жилых и общественных зданий такой защиты нет.

Большое практическое значение имеет борьба с задымлением на начальной стадии пожара в небольших помещениях жилых и административных зданий, производственных и складских помещениях при неразвившемся очаге пожара. Этот вопрос в настоящее время становится все актуальнее в связи с расширением использования материалов и изделий на основе полимеров, горение и тление которых сопровождается выделением большого количества дыма. Сгорание незначительного количества подобных

материалов приводит к потере видимости и существенно усложняет обнаружение очага пожара и его подавление. Отсутствие эффективных средств борьбы с задымлением в ряде случаев является причиной перехода пожара в развитую стадию.

Для обеспечения видимости при пожаре можно использовать традиционный способ – удаление дыма. Однако он обладает существенным недостатком – при увеличении отвода дыма увеличивается приток воздуха, что способствует интенсификации горения.

Одним из путей решения проблемы может стать применение стационарных и переносных средств осаждения дыма с использованием физико-химических методов очистки газовой среды от твердых частиц. Такие методы находят широкое применение для очистки газов и воздуха в различных технологических процессах. Теоретические и практические вопросы очистки газовой среды от дисперсной фазы достаточно глубоко разработаны для улавливания промышленной пыли и различного рода твердых примесей. Однако дым при пожарах по химической природе и составу существенно отличается от указанных аэродисперсных систем, поэтому применение общепринятых теоретических положений механики аэрозолей в данном случае неправомерно. Отличие структуры, состава и физико-химических свойств дыма и условий его выделения при пожарах приводит к необходимости проведения экспериментальных и теоретических исследований, направленных на разработку и создание экономичных способов, технических средств, составов и веществ, обеспечивающих возможность эффективного дымоподавления и снижения концентрации токсичных газообразных компонентов продуктов горения.

Для оперативного дымоосаждения в аварийном помещении предлагается использовать диспергированную воду, подаваемую с помощью дымососов, рассчитанных на нагнетание.

Анализ последних исследований. В работах [2, 3, 4] описаны конструкция, принцип действия устройства по подаче распыленной воды в задымленное помещение. Однако теоретическое обоснование параметров этих устройств отсутствует.

Цель исследований. Необходимо математическое моделирование процесса осаждения твердых частицы дыма с учетом распределения их концентрации, аэродинамики газожидкостных потоков в аварийном помещении и необходимых условий видимости в задымленном объеме.

Материалы и результаты исследований. В общем виде механизм улавливания частиц дыма каплями воды включает в себя два взаимосвязанных процесса: коагуляцию твердых частиц и капель жидкости и оседание полученных агломератов за счет силы тяжести. Процесс состоит из пяти последовательных стадий, каждая из которых характеризуется определенной степенью вероятности:

- встреча частиц дыма на пути своего движения с каплей;
- соприкосновение частицы с каплей;
- удержание;
- захват частицы каплей;
- оседание получившегося агломерата в газовой воздушном потоке.

Объем аварийного помещения обозначим V_{ab} , м³, объем, заполненный каплями диспергированной воды, $V = SL$, м³, где S – площадь поперечного сечения помещения, м²; L – дальность подачи диспергированной воды, м.

Составим уравнение материального баланса частиц дыма в зоне дымоосаждения. Очаг пожара в единицу времени образует \dot{M} , кг/с, дыма или, пренебрегая массой газообразных продуктов горения, количество частиц $N_{обр}$, с⁻¹:

$$N_{обр} = \frac{3\dot{M}}{4\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}}}, \quad (1)$$

где $d_{\text{ч}}$ и $\rho_{\text{ч}}$ – соответственно диаметр частиц, м, и их плотность, кг/м³.

Предположим, что эти частицы равномерно распределяются по объему $(V_{ab} - SL)$, м³, части аварийного помещения, т.е. концентрация вновь образуемых частиц дыма $n_{обр}$, м⁻³·с⁻¹:

$$n_{обр} = \frac{3\dot{M}}{4\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} (V_{ab} - SL)}. \quad (2)$$

Потоком воздуха, нагнетаемого дымососом, через проем 1 (рис.1) удаляется ежесекундно $N_{уд}$, с⁻¹, частиц:

$$N_{уд} = n_{обр} Q_{возд} = \frac{3\dot{M} Q_{возд}}{4\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} (V_{ab} - SL)}. \quad (3)$$

Остальные из вновь образованных частиц дыма ежесекундно поступают в зону дымоосаждения в количестве $N_{пост}$, с⁻¹:

$$N_{пост} = N_{обр} - N_{уд} = \frac{3\dot{M}}{4\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}}} \left(1 - \frac{Q_{возд}}{(V_{ab} - SL)}\right). \quad (4)$$

Пусть в момент времени τ количество частиц дыма в объеме зоны дымоосаждения равно $N_{\text{ч}}(\tau)$. Это количество убывает в единицу времени на

$$N_{осажд} = a N_{\text{ч}}(\tau), \quad (5)$$

где $0 < a < 1$ – коэффициент осаждения.

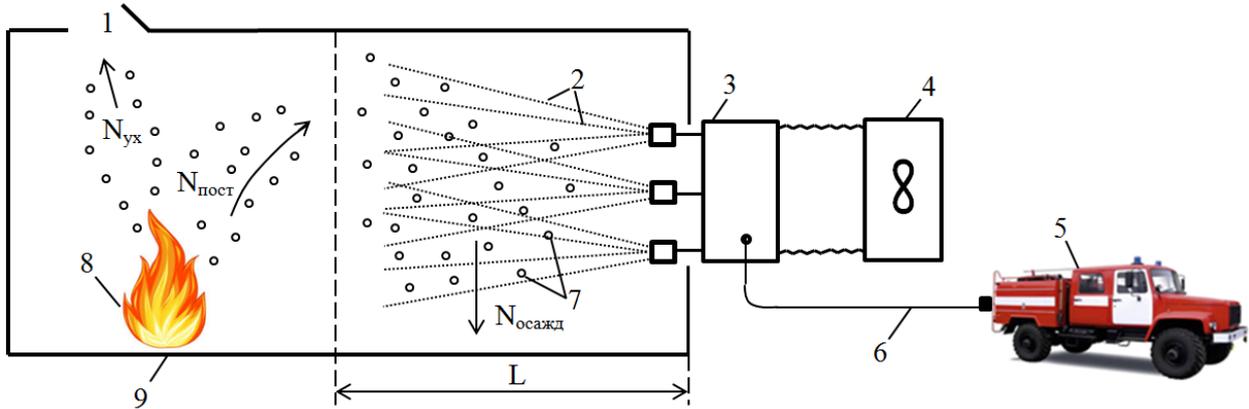


Рис. 1. Схема подачи диспергированной воды в аварийное помещение:
 1 – проем для удаления продуктов горения; 2 – капли воды; 3 – устройство для подачи диспергированной воды; 4 – дымосос; 5 – пожарный автомобиль; 6 – пожарный рукав;
 7 – частицы дыма; 8 – очаг пожара; 9 – аварийное помещение

За промежуток времени $d\tau$ изменение количества частиц

$$N_q(\tau + d\tau) = N_q(\tau) - aN_q(\tau) + N_{\text{пост}}(\tau); \quad (6)$$

$$dN_q(\tau) = -aN_q(\tau)d\tau + \frac{3\dot{M}}{4\pi d_q^3 \rho_q} \left(1 - \frac{Q_{\text{возд}}}{(V_{ab} - SL)}\right) d\tau; \quad (7)$$

$$dN_q(\tau) = (b - aN_q(\tau))d\tau, \quad (8)$$

где обозначено

$$b = \frac{3\dot{M}}{4\pi d_q^3 \rho_q} \left(1 - \frac{Q_{\text{возд}}}{(V_{ab} - SL)}\right). \quad (9)$$

Интегрируя выражение (7) по времени, получаем

$$\int_0^\tau \frac{dN_q(\tau)}{b - aN_q(\tau)} = \int_0^\tau d\tau; \quad (10)$$

$$\ln(aN_q(\tau) - b) = -a\tau + C. \quad (11)$$

Постоянную интегрирования C найдем из начальных условий

$$\text{при } \tau = 0; N_q(0) = N_0 \quad (12)$$

$$C = \ln(aN_0 - b).$$

Тогда

$$N_{\text{ч}}(\tau) = e^{-a\tau} \left[N_0 + \frac{b}{a} (e^{a\tau} - 1) \right]. \quad (13)$$

Скорость выделения дыма \dot{M} , кг/с, может быть рассчитана по уравнению

$$\dot{M} = 0,096 P \rho_0 y^{3/2} \left(g \frac{T_0}{T} \right)^{1/2}, \quad (14)$$

где P – периметр очага пожара, м;

ρ_0 – плотность воздуха, кг/м³;

y – расстояние от пола помещения до нижней границы дыма, м;

$g = 9,81$ м/с² – ускорение свободного падения;

T_0 – начальная температура окружающей среды, К;

T – температура в очаге пожара, К.

При $\rho_0 = 1,29$ кг/м³; $T_0 = 293$ К; $T = 1073$ К имеем

$$\dot{M} = 0,2 P y^{3/2}; \quad (15)$$

$$b = \frac{0,048}{d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}}} \left(1 - \frac{Q_{\text{возд}}}{(V_{\text{аб}} - SL)} \right). \quad (16)$$

Таким образом, генерация новых частиц дыма определяется размерами очага пожара и аварийного помещения.

Основным определяющим параметром процесса мокрого дымоосаждения является коэффициент захвата, представляющий собой отношение количества частиц дыма, соударяющихся с каплей, к количеству частиц, которые соударялись, если бы линии тока не отклонялись препятствием (каплей). При этом предполагается, что все частицы захватываются каплей при соударении или касании с ней (рис. 2).

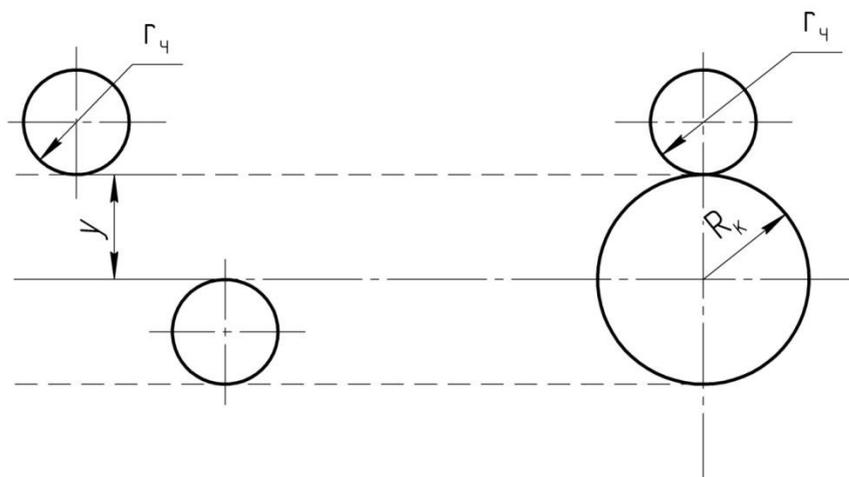


Рис. 2. Модель улавливания частиц дыма каплями жидкости

Количество капель, постоянно находящихся в объеме V , равно

$$N_K = \frac{3G_{ж}}{4\rho_{ж}\pi d_K^3}, \quad (17)$$

где $G_{ж}$ – расход распыляемой жидкости (воды), кг/с;

$\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³;

d_K – диаметр капель жидкости, м.

Концентрация капель:

$$n_K = \frac{N_K}{V} = \frac{3G_{ж}}{4\rho_{ж}\pi d_K^2 V}. \quad (18)$$

Объем, проходимый каплей за время $d\tau$, с:

$$dV_K = \frac{\pi d_K^2 v_K}{4} d\tau, \quad (19)$$

где v_K – скорость капли, м/с.

Количество капель в этом объеме

$$dN_K = n_K dV_K = \frac{3G_{ж}v_K d\tau}{16\rho_{ж}d_K V}. \quad (20)$$

Количество частиц дыма в объеме V в момент времени τ равно $N_q(\tau)$.

Их концентрация

$$n_q = \frac{N_q(\tau)}{V}, \quad (21)$$

а количество в объеме dV_K

$$dN_q(\tau) = \frac{N_q(\tau)\pi d_K^2 v_K}{4V} d\tau. \quad (22)$$

Количество частиц, улавливаемых каплями:

$$dN_{\text{осажд}}(\tau) = \xi_0 \frac{N_q(\tau)\pi d_K^2 v_K}{V} d\tau, \quad (23)$$

где ξ_0 – коэффициент захвата частиц дыма каплями воды. Сравнивая уравнения (5) и (23), получаем

$$a = \frac{\xi_0 \pi d_K^2 v_K}{V}. \quad (24)$$

Коэффициент захвата по аналогии с работой [5]:

$$\xi_0 = 1 - 0,75 \exp\left[\frac{-18Q_{\text{ж}}H}{\pi R_{\phi} v_{\text{к}}}\right] \frac{\pi(d_{\text{к}}+d_{\text{ч}})^2}{4d_{\text{к}}^3}, \quad (25)$$

где $Q_{\text{ж}}$ – объёмный расход воды, м³/с;
 H – высота расположения распылителей, м;
 R_{ϕ} – радиус распыления воды, м.

Принимаем в первом приближении, что оптическая плотность дыма μ_D , м⁻¹, пропорциональна полю концентрации твердых частиц дыма:

$$\mu_D = k n_{\text{ч}}, \quad (26)$$

где k – коэффициент подобия.

Дальность видимости V_s , м, определяется по эмпирической зависимости

$$V_s = 2,68 \mu_D^{-1,036}. \quad (27)$$

Задаваясь требуемым значением дальности видимости V_s , по формуле (27) определяем оптическую плотность дыма, а затем по зависимости (13) с учетом (15), (16) и (24) для определенных значений расхода распыливаемой жидкости $G_{\text{ж}}$, диаметров капель и частиц дыма $d_{\text{к}}$, $d_{\text{ч}}$, параметров очага пожара и подачи дымососа $Q_{\text{возд}}$ рассчитываем требуемую продолжительность подачи распыленной воды в аварийное помещение.

Выводы. Разработана математическая модель дымоосаждения с использованием распыленной воды, подаваемой дымососом в аварийное помещение. Её численная реализация позволяет определить необходимую интенсивность и продолжительность подачи воды.

Список литературы / References

1. Петров, П.Б. Некоторые проблемы тушения пожаров в помещении // Пожарная безопасность. – 2009. – № 2. – С. 90 – 95.

Petrov, P.B. *Nekotoryye problemy tusheniya pozharov v pomeshchenii* [Some problems of fighting the fires in premises]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*. 2009, no. 2, pp. 90 – 95.

2. Шмудевцов, И.А. Выбор оптимальных режимов работы устройства по доставке распыленной воды в очаг пожара // Чрезвычайные ситуации: образование и наука: Международный науч.-практический журн. – Гомель: ГИИ МЧС Республики Беларусь, 2012. – Т. 7, № 1. – С. 34 – 38.

Shmulevtsov, I.A. *Vybor optimal'nykh rezhimov raboty ustroystva po dostavke raspylyennoy vody v ochag pozhara* [Choice of best performances of operation of a device for delivery of the sprayed water to a seat of fire]. *Chrezvychaynyye situatsii: obrazovaniye i nauka: Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal – Emergency situations: education and science: International theoretical and*

practical journal. Номyel', ГII MChS Respubliki Belarus', 2012, vol. 7, no. 1, pp. 34 – 38.

3. Луц, В.І., Мельник, П.І. Лабораторні дослідження пристрою подачі повітряно-водяного струменю для осадження продуктів горіння, зниження температури та покращення видимості // Технологія устаткування лісовиробничого комплексу: зб. наук.-техн. праць НЛТУ України. – 2011. – Вип. 21 (8) – С. 86 – 92.

Lushch, V.I., Mel'nyk, P.I. *Laboratorni doslidzhennia prystroiu podachi povitriano-vodianogo strumeniu dlia osadzhennia produktiv gorinnia, znyzhennia temperatury ta pokrashchennia vydylosti* [Laboratory investigations of the device for supply of the air-water stream to precipitate the combustion products, to decrease the temperature and to increase the visibility]. *Tekhnologiiia ustatkuvannia lisovyrobnychogo kompleksu: zb. naukovo-tekhnichnykh prats' NLTU Ukrainy* [Technology of equipping the timber industrial complex: collected scientific-technical papers of the NLTU of the Ukraine]. 2011, issue 21 (8), pp. 86 – 92.

4. Чорнобай, В.А., Луц, В.І. Експериментальні дослідження використання пожежного димовсмоктувача для подачі повітряно-водяного струменя в задимлене приміщення // Теорія і практика ліквідації надзвичайних ситуацій: зб. тез всеукраїнської наук.-практ. конф. – Львів: ЛДУ БЖД, 2013. – С. 128 – 130.

Chornobai, V.A., Lushch, V.I. *Eksperymental'ni doslidzhennia vykorystannia pozhezhnogo dymovsmoktuvacha dlia podachi povitriano-vodianogo strumenia v zadymlene prymishchennia* [Experimental investigations of the use of the fire smoke exhauster for the supply of the air-water stream into the premises screened with smoke]. *Teoriia i praktyka likvidatsii nadzvychaynykh situatsii: zb. tez vseukrains'koi nauk.-prakt. konf.* [Theory and practice of elimination of emergency situations: collected theses of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference]. Lviv, LDU BZhD, 2013, pp. 128 – 130.

5. Дюсебаев, М.К. Пылеподавление пеной на горнорудных предприятиях. – Алма-Ата: Наука, 1989. – 355 с.

Dyusebayev, M.K. *Pylepodavleniye penoy na gornorudnykh predpriyatiyakh* [Suppression of dust with foam at mining enterprises]. Alma Ata, Nauka Publ., 1989, 355 p.

Andrey Mikhaylovich Bogomaz, postgraduate student; e-mail: mchs-dnr@mail.ru;

Igor Felixovich Dikensteyn, scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-39-70

REDUCTION OF SMOKE CONTENT IN PREMISES BY SUPPLY OF THE AIR-WATER MIXTURE

Purpose. Determination of parameters of the air-water mixture supply into the dangerous premise by means of smoke exhausters to reduce the smoke content.

Methods. Analytical investigations of the process of interaction of drops of water dispersed with the smoke particles.

Results. The dependence for calculation of the concentration of the smoke particles in the dangerous premise subject to the time and intensity of the air-water mixture supply was received.

Scientific novelty. The dependence of the range of visibility in the dangerous premise on the parameters of the seat of fire (intensity of the smoke formation) and intensity of the air-water mixture supply was established.

Practical value. The methods of calculation of the decrease of the smoke content by supply of the water dispersed into the dangerous premise by means of the portable smoke exhausters being in the inventory of the fire-rescue forces of the Ministry of Emergency Situations of the Donetsk People’s Republic were worked out. This will allow determining the necessary time of operation of the smoke exhauster and the consumption of the air-water mixture to guarantee the necessary visibility and safety by elimination of the emergency situations.

Keywords: *smoke particles; smoke precipitation; smoke exhausters; concentration of particles; capture efficiency; water consumption.*

УДК 622.822.2+614.841.2

Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: obep.niigd@list.ru;

*Петр Семенович Пашковский, д-р техн. наук, первый замдиректора по науч. работе;
e-mail: niigd@mail.ru;*

Александр Александрович Всякий, ст. науч. сотр.; e-mail: sentyabr.eger@inbox.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, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-13-52*

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ЭНДОГЕННОЙ ПОЖАРООПАСНОСТИ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Разработка комплексного показателя пожароопасности твердых органических веществ для определения их склонности к самовозгоранию, группы пожароопасности, инкубационного периода, порогового значения критерия оценки склонности к самовозгоранию.

Методика. Анализ и обобщение исследований химической активности различных твердых органических веществ, критических температур их самовозгорания, мест возникновения эндогенных пожаров и их размеров, условий теплоотдачи.

Результаты. Предложено использовать математическую модель гетерогенного окисления углей с учетом испарения влаги и дросселирования метана для разработки комплексного показателя эндогенной пожароопасности различных органических веществ. Показано, что существенное влияние на изменение температуры веществ оказывают константа скорости реакции окисления и испарения влаги, теплота дросселирования метана, газоносность пласта, теплота испарения влаги, критерий V_i и концентрация кислорода в угле. Получена зависимость для определения комплексного показателя пожароопасности с учетом выделения теплоты и ее отдачи, применимая для различных органических твердых веществ. Обоснованы параметры разделения шахтопластов по группам пожароопасности на основе математической модели и данных о более 200 происшедших аварий. Установлены зависимости для определения порогового значения комплексного показателя пожароопасности различных твердых веществ органического происхождения.

Практическая значимость. Полученные зависимости можно использовать для определения эндогенной пожароопасности угольных пластов и твердых веществ органического происхождения.

Выводы. Разработан новый комплексный показатель эндогенной пожароопасности твердых веществ органического происхождения, позволяющий на основании данных лабораторного анализа определить критическое значение пожароопасного скопления, пороговые значения критерия склонности к самовозгоранию, инкубационный период, группу пожароопасности.

Ключевые слова: самовозгорание; критическая температура; критическая толщина скопления; инкубационный период; группа эндогенной пожароопасности.

Проблема и ее связь с важными научными и практическими задачами. На тепловое самовозгорание твердых органических веществ влияет кинетика процесса окисления, параметры, характеризующие структуру и теплофизические свойства вещества, а также условия теплообмена между веществом и окружающей средой.

Практикой установлены качественные характеристики отдельных факторов пожароопасности органических веществ, способствующих повышению

вероятности их самовозгорания. Так, например, опасность возникновения эндогенного пожара возрастает в местах нарушения залегания пластов, резкого изменения их толщины, при низкой скорости подвигания очистных забоев, активных утечках воздуха через выработанное пространство и т.д. Известно также, что уголь некоторых пластов обладает крайне высокой химической активностью и самовозгорается даже при благоприятных условиях залегания и разработки. Другие угли, имеющие низкую химическую активность, самовозгораются только при крайне неблагоприятных горно-геологических и горно-технических условиях [1].

Наиболее изученными являются методы комплексной оценки эндогенной пожароопасности угольных пластов, один из этих методов [1] позволяет установить категорию опасности выемочного поля (участка) или шахтопласта и выявить условия, от которых зависит повышенная эндогенная пожароопасность отдельных участков. Этот метод включает в себя отдельные горно-геологические и технологические факторы пожароопасности, их значимость и суммарную оценку с учетом показателя весомости каждого фактора:

- склонность угля к самовозгоранию;
- геологические условия залегания пласта;
- условия эксплуатации пласта.

Согласно методу комплексной оценки эндогенной пожароопасности, основанному на анализе более 100 эндогенных пожаров в угольных шахтах, выемочные поля (участки) и шахтопласты по пожароопасности делят на 4 группы:

I группа – весьма пожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности K_0 превышает 0,5;

II группа – пожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности находится в пределах от 0,3 до 0,5;

III группа – умеренно пожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности находится в пределах от 0,1 до 0,3;

IV группа – непожароопасные участки, комплексный показатель пожароопасности не превышает 0,1.

К недостатку метода относится трудоемкость вычислений.

Существует более простой метод деления шахт по пожарной опасности, основанный на статистических исследованиях влияния взаимосвязанных факторов на частоту возникновения эндогенных пожаров, межпожарный период и вероятность возникновения пожаров. Это позволяет для каждой шахты установить группу пожароопасности шахтопласта.

В результате статистических исследований выявлено, что за последнее время в значительной степени изменились: глубина разработки угольных пластов и их газоносность – возросли; толщина разрабатываемых пластов – как правило, снизилась; длина очистного забоя – возросла. Кроме того, существующая методика группирования шахтопластов по пожарной опасности не учитывает влияния потерь угля в геологических нарушениях, являющихся

одним из существенных факторов вероятности возникновения эндогенных пожаров. Поэтому в 2008 г. была предложена методика, которая позволяет определять интенсивность возникновения эндогенных пожаров на основании физических предпосылок, рассчитывать вероятность возникновения эндогенных пожаров и группировать шахтопласты по пожарной опасности [2].

Все перечисленные методы позволяют найти только один параметр – группу эндогенной пожароопасности. Определение другого комплексного параметра, отражающего склонность углей к самовозгоранию, проводят другими методами. В то же время возможность использования перечисленных параметров применительно к другим органическим веществам до сих пор никем показана не была.

Цель работы – определение комплексного показателя пожароопасности твердых органических веществ, позволяющего одновременно установить склонность к самовозгоранию, группу пожароопасности, инкубационный период и пороговое значение критерия склонности на основе ранее предложенной модели низкотемпературного окисления органических веществ и экспериментальных данных о горении углей за длительный период времени, собственных и литературных данных о свойствах пожароопасных органических веществ.

Материалы и результаты исследований. Окисление и самовозгорание веществ растительного происхождения в отличие от окисления углей заключается в том, что начало этому процессу дает первичное самонагревание вещества за счет теплоты, выделяемой микроорганизмами, а вызванное повышение температуры способствует ускорению экзотермической реакции, которая может закончиться возникновением горения в самой нагретой части объема.

Причиной выделения теплоты при хранении зерна, сена, семян маслянистых культур, волокон растительного и животного происхождения и подобных органических веществ является поглощение кислорода плесенью, грибами и бактериями, которые содержатся в этих веществах и интенсивно размножаются в присутствии необходимого количества влаги. Активный рост и размножение грибков при обычной температуре наблюдают при относительной влажности воздуха до 96 % и равновесной влажности растительного сырья до 40 % и более [3, 4].

Рост температуры, связанный с биологической активностью грибков, определяется разностью между скоростью выделения теплоты и теплопотерями. Наблюдают две стадии жизнедеятельности микробиологических объектов, связанных с потреблением кислорода, выделением диоксида углерода и теплоты в растительной массе [5].

Помимо этого имеются еще два источника выделения дополнительной биологической теплоты. Первый из них – это дыхание растительных веществ, у которых жизнедеятельность продолжается некоторое время после их уборки с поля. Примером такого механизма является быстрое саморазогревание

небольших куч свежескошенной травы. При формировании стога сена остаточная активность этого типа выделения теплоты может служить начальным импульсом для более быстрого микробиологического тепловыделения и таким образом влиять на самовоспламенение и загорание стога. Такое выделение теплоты характерно и для хранилищ зерна, в которых в присутствии влаги зерно начинает прорастать. Однако этот процесс обычно быстро опережается процессом выделения теплоты микроорганизмами.

Вторым дополнительным источником теплоты может быть заражение насекомыми массива относительно сухого зерна. Главное следствие заражения – появление влаги и повышение температуры в различных точках вещества, способствующие увеличению влажности не только в нагретых, но и в холодных его частях, а также развитие микробиологического разогревания.

В настоящее время считают, что максимальная температура, которую могут создать биологические системы, равна 75 °С, а для зерновых культур 60...65 °С. По другим источникам, наблюдаемый температурный предел биологической активности микроорганизмов 85...88 °С [5].

Таким образом, за начальную температуру процесса окисления при тепловом самонагревании органического вещества (кроме угля) следует принимать 70 °С (343 К), т.е. температуру гибели большинства микроорганизмов. Она наступает через 3...33 сут в зависимости от типа вещества, его влажности и условий хранения. Дальнейшее повышение температуры происходит уже за счет химических реакций окисления веществ также, как это достаточно полно изучено для углей.

По результатам исследования, приведенного в работе [6], решение задачи самонагревания угля за счет химических реакций окисления его кислородом и с учетом выделения метана и испарения влаги имеет вид

$$t_{|Bi \neq 0} = - \frac{\ln \left[- \left(\frac{T_{кр}}{T_0} - 1 - \frac{1}{b} \right) b \right]}{b} \frac{\rho c_V T_0}{\xi C_{O_2} q_1 k_{кр} - q_{др} J_M - q_B k_B W} \quad (1)$$

|----- t -----|
|----- B -----|

где t – время, с;

T_0 и $T_{кр}$ – начальная и критическая температуры угля, К;

b – критерий скорости нагревания угля, определяемый зависимостью

$$b = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1; \quad (2)$$

Bi – критерий теплообмена Био, равный

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

- α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К);
 Γ_T – комплексный критерий генерации теплоты скоплением органического вещества толщиной R_{cp} ;

$$\Gamma_T = \frac{1}{B} \frac{R_{cp}^2}{a}; \quad (4)$$

- R_{cp} – радиус скопления вещества, м;
 a – коэффициент температуропроводности, м²/с;
 ξ – доля реакционной поверхности, вступающей в реакции окисления;
 C_{O_2} – концентрация кислорода в веществе, моль/м³;
 q_1 – теплота реакции окисления, Дж/моль;
 $k_{кр}$ – константа скорости окисления, с⁻¹;
 ρ – плотность вещества, кг/м³;
 c_v – удельная теплоемкость вещества при постоянном объеме, Дж/(кг·К);
 $q_{др}$ – теплота дросселирования метана, Дж/моль;
 J_M – интенсивность выделения метана, моль/(м³·с), равная

$$J_M = \frac{G}{t_{п}}; \quad (5)$$

- G – газоносность пласта, моль/м³;
 $t_{п}$ – пороговое время самовозгорания угля; принимают равным $3 \cdot 10^6$ с;
 k_v – константа скорости испарения влаги, с⁻¹;
 q_v – теплота испарения влаги, Дж/моль;
 W – концентрация влаги в угле, моль/м³.

Входящий в выражение (1) параметр \bar{t} учитывает величину b , характеризующую тепловыделение Γ_T из скопления самонагревающегося органического вещества, и теплоотвод Vi , а также соотношение критической $T_{кр}$ и начальной T_0 температуры веществ. Эти величины полностью характеризуют физико-химические свойства и параметры скопления органического вещества. Поэтому параметр \bar{t} можно считать обобщенным комплексным показателем склонности веществ к самовозгоранию.

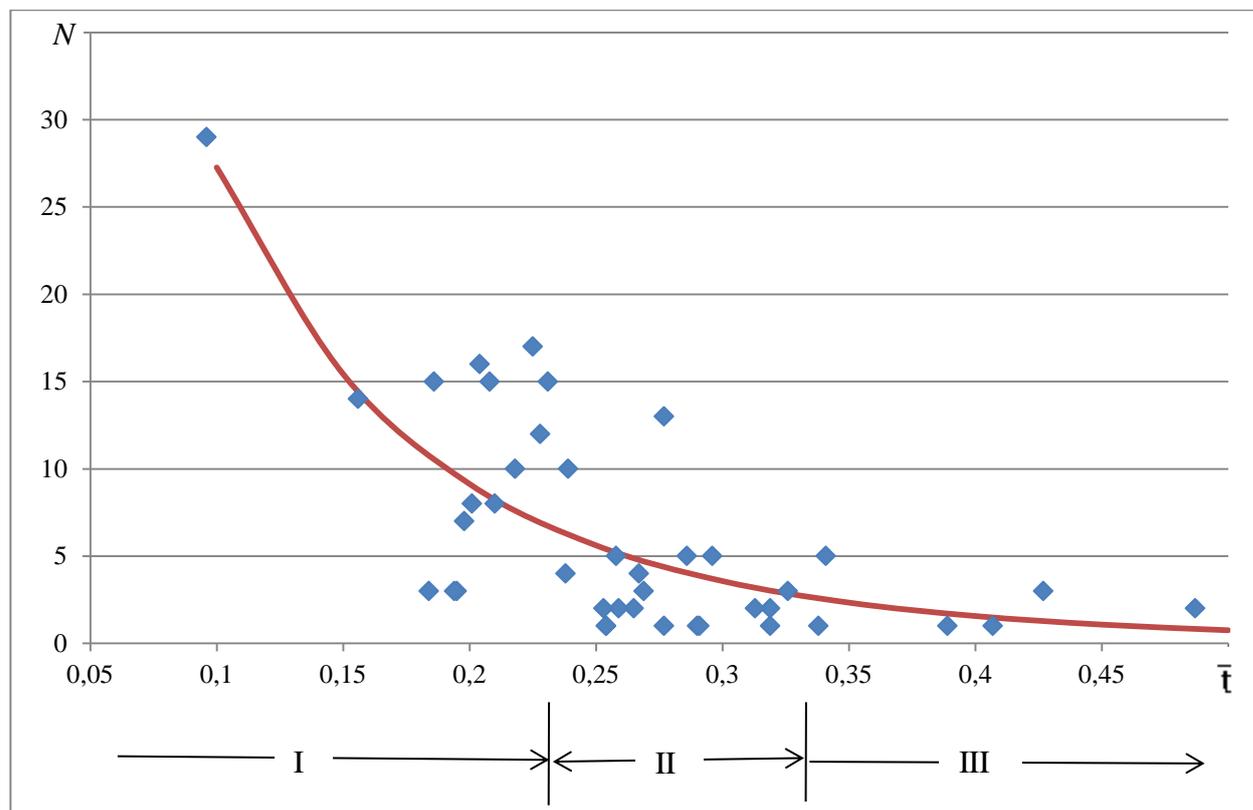
Для выяснения влияния величин b и $T_{кр}/T_0$ на изменение комплексного показателя \bar{t} воспользуемся данными об угле – одном из органических веществ, по которому имеется обширный экспериментальный материал [1] по более чем 200 проанализированным случаям самовозгорания в различных местах слоевых скоплений угля.

Эти скопления были обусловлены наличием в непосредственной близости от разрабатываемого пласта в кровле или почве пропластков угля или углистого сланца, попадающих при выемке пласта в зону обрушения пород; выемкой пласта не на полную мощность по техническим соображениям; геологическими нарушениями пласта в виде утолщений, при которых его выемка на полную

мощность практически невозможна; нарушениями в виде надвигов, сбросов, проходимых очистными работами. В выработанных пространствах пластов крутого падения, имеющих в почве слабые, неустойчивые, склонные к сползанию породы, происходит обрушение целиков угля, а также завалы лав. При этом выемка обрушенного угля была практически невозможна.

Исследования слоевых скоплений угля заключались в проведении комплекса шахтных и лабораторных экспериментов, что позволило рассчитать значение критического радиуса, результаты определения которого на ряде шахт Донбасса приведены в табл. 1.

Анализ этих результатов показывает, что эндогенные пожары происходят, как правило, в слоевых скоплениях углей, имеющих размеры выше критических. На 46 обследованных шахтопластах за 10 лет произошло 256 эндогенных пожаров. При этом пожары – на шахтопластах, где фактические размеры угольных скоплений превышают критические (см. рисунок).



Зависимость количества эндогенных пожаров N от комплексного показателя пожароопасности \bar{t} и группы пожароопасности

Таблица 1

Параметры угольных скоплений, их критические размеры, инкубационный период самовозгорания и комплексный показатель пожарной опасности

Шахта	Плоск	V^* , %	$k_{кр} \cdot 10^3$, $с^{-1}$	$T_{кр}$, К	ξ	$J_m \cdot 10^4$, моль/м ³	W , моль/м ³	Радиус скопл.		\bar{t}	t , сут	Кол-во эндоген. пожаров N	Группа эндогенной пожаро-опасности
								факт. $R_{ср}$	крит. $R_{кр}$				
«Северная»	l_3	25	2,82	358	0,0067	1,93	975	0,65	0,11	0,195	8,2	3	I
Им. А.Ф. Засядько	m_3	35	2,97	385	0,0054	4,21	1071	0,3	0,16	0,427	24,1	3	III
Им. Г.Г. Капустина	m_3	27	1,88	327	0,0066	3,602	1661	0,35	0,12	0,096	5,0	29	I
«Александровская»	l_1	9	2,0	380	0,0059	2,083	2489	0,40	0,13	0,326	18,3	3	II
«Булавинская»	l_1	9	1,89	366	0,0059	3,17	2446	0,25	0,15	0,341	19,8	5	III
Им. В.И. Ленина	l_3	29	1,59	360	0,0063	4,091	1527	0,80	0,16	0,201	10,3	8	I
«Комсомолец Донбасса»	m_3	26	2,0	373	0,0066	6,063	1584	0,95	0,22	0,239	11,9	10	II
Им. М.И. Калинина	l_4	19	1,81	375	0,0068	4,826	940	0,40	0,17	0,290	14,7	1	II
Им. К.А. Румянцева	l_5	22	2,04	375	0,0068	2,594	1937	0,60	0,19	0,258	11,8	5	II
«Александр-Запад»	l_1	10	1,98	352	0,0060	3,840	1358	0,50	0,07	0,186	10,0	15	I
«Горецкая»	l_4	32	0,92	380	0,0059	1,176	3000	0,30	0,20	0,407	24,2	1	III
Им. Ильича	l_2^1	20	0,73	374	0,0068	1,399	1000	0,30	0,16	0,338	18,4	1	III
Им. И.В. Чеснокова	l_8	30	1,73	372	0,0062	1,681	1698	0,45	0,18	0,269	13,7	3	II
«Красногвардейская»	l_1	32	2,24	372	0,0059	2,879	1290	0,40	0,17	0,277	14,0	13	II
«Святителя Василия»	l_7	38	1,83	340	0,0047	1,624	10026	0,40	0,14	0,156	11,9	14	I
«Новодруженская»	k^H_8	42	1,33	340	0,0035	1,741	8594	0,29	0,08	0,208	21,0	15	I
«Кременная»	l^1_1	40	1,67	370	0,0041	2,442	8535	0,30	0,15	0,487	40,4	2	III
Им. Артема	l^1_2	13	2,69	360	0,0064	2,862	1567	0,35	0,09	0,225	10,0	17	I
«Угледорская»	l_1	8	9,90	355	0,0057	2,667	1999	0,35	0,07	0,204	9,1	16	I
«Булавинская»	l_1	8	1,89	366	0,0057	3,299	2792	0,35	0,08	0,286	17,9	5	II
Им. К. Маркса	k^H_4	14	1,83	375	0,0065	4,074	2282	0,40	0,12	0,291	14,8	1	II

Из анализа представленных данных следует, что имеется определенная связь между количеством пожаров и значением \bar{t} , причем с увеличением \bar{t} количество пожаров снижается и может быть описано зависимостью

$$N = 0,57(\bar{t} + 0,46)^{-6,65}. \quad (6)$$

Так как при получении зависимости (6) были использованы данные лабораторных исследований углей и фактические данные о происшедших с ними пожарах в шахтах при самых различных горно-геологических условиях и горно-технических факторах, определяющих пожароопасность разработки пластов, то предлагаемый показатель \bar{t} можно считать показателем не только склонности, но и пожароопасности пластов.

Из рисунка видно, что большинство пожаров (68,4 %) произошло при значении комплексного показателя пожароопасности $\bar{t} \leq 0,23$, 26,6 % при \bar{t} от 0,23 до 0,33 и 5 % при \bar{t} от 0,33 до 0,53.

С учетом ранее выполненных исследований [1] и на основании полученных результатов предлагается следующее разделение шахтопластов по группам эндогенной пожароопасности в зависимости от комплексного показателя \bar{t} :

- I – особо опасные шахтопласты (участки), $\bar{t} \leq 0,23$;
- II – пожароопасные шахтопласты (участки), $0,23 < \bar{t} \leq 0,33$;
- III – малоопасные шахтопласты (участки), $0,33 < \bar{t} \leq 0,53$.

При определении склонности углей к самовозгоранию в настоящее время используют критерий $t_{\text{п}}$ – пороговое время, при превышении которого предполагают, что угольные пласты будут не склонны к самовозгоранию [1].

В приведенных исследованиях пороговый комплексный показатель склонности угля к самовозгоранию является безразмерной величиной, равной $\bar{t}_{\text{п}} = 0,53$, выше этого значения не было ни одного пожара. Чтобы сравнить его с применяемым в настоящее время критерием, достаточно $\bar{t}_{\text{п}}$ умножить на среднее значение параметра B в уравнении (1). Получаем значение $2,6 \cdot 10^6$ с, что близко к используемому в настоящее время значению $t_{\text{п}} = 3 \cdot 10^6$ с.

Еще одним параметром пожароопасности является инкубационный период самовозгорания угля. Согласно настоящим исследованиям он находится умножением комплексного показателя \bar{t} на величину B , характерную для каждого угля. В исследованных случаях инкубационный период t – от 5 до 40 сут (см. табл. 1).

С использованием установленного показателя \bar{t} рассчитаны минимальные скопления угля, подверженного самовозгоранию, согласно зависимостям, приведенным в работе [6]. Эти значения несколько меньше вычисленных автором [1], что дает запас расчета допустимых потерь угля в шахтах при разработке пластов, склонных к самовозгоранию.

Таким образом, предложенный комплексный показатель пожароопасности \bar{t} позволяет определить все необходимые характеристики

пожароопасности органического вещества: пороговые значения склонности к самовозгоранию, группу эндогенной пожароопасности, инкубационный период, минимальное скопление вещества, поэтому он является универсальным критерием эндогенной пожароопасности.

С целью возможности использования найденного на примере угля предлагаемого показателя пожароопасности для других органических веществ обратимся к данным [4], содержащим экспериментальный материал по различным типам органических веществ, имеющих зафиксированные случаи самовозгорания в промышленных условиях.

На примере муки костной (крупнозернистой) рассмотрим условия теплового самовозгорания при хранении ее в штабеле размером $4,8 \times 15,7 \times 4$ м. Для заданной формы и размера вещества рассчитаем удельную наружную поверхность S , м^{-1} , по формуле

$$S = F/V, \quad (7)$$

где F – полная наружная поверхность образца материала, м^2 ;
 V – объем материала, м^3 .

Определим температуру самовозгорания T_c по формуле

$$\lg T_c = A_p + n_p \lg S, \quad (8)$$

где A_p и n_p – эмпирические коэффициенты.

Для самых распространенных органических веществ эмпирические коэффициенты установлены, в противном случае необходимо проводить экспериментальные исследования для их определения в соответствии с ГОСТ 12.1.044. Так, для муки костной $S = 1,044 \text{ м}^{-1}$ и из уравнения (8) $T_c = 289 \text{ К}$, которую принимаем за критическую температуру окружающей среды. Критическую температуру самовозгорания вещества рассчитываем из уравнения (8) для куба с размером ребра $0,035 \text{ м}$, т.е. для $S = 171,43 \text{ м}^{-1}$ имеем $T_{\text{кр}} = 463 \text{ К}$. В расчетах за начальную температуру вещества T_0 принимаем 343 К .

Константу скорости окисления $k_{\text{кр}}$, с^{-1} , определяем из уравнения

$$k_{\text{кр}} = k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{\text{кр}}}\right), \quad (9)$$

где k_0 – предэкспоненциальный множитель, с^{-1} ;

E – энергия активации, Дж/моль;

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

Коэффициент теплоотдачи α , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, находим по формуле

$$\alpha = \frac{0,42\lambda_{\text{пр}}}{R_{\text{ср}}}, \quad (10)$$

где $\lambda_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплопроводности, определяемый зависимостью

$$\lambda_{\text{пр}} = \varepsilon\lambda_{\text{в}} + (1 - \varepsilon)\lambda_{\text{м}}, \quad (11)$$

ε – коэффициент порозности (скважистости) скопления вещества, принимаемый 0,4;

$\lambda_{\text{в}}$ – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К);

$\lambda_{\text{м}}$ – коэффициент теплопроводности органического вещества, Вт/(м·К).

Критерий теплообмена Vi определяем по формуле (3), а комплексный критерий генерации теплоты Γ_T из выражения [7]

$$\Gamma_T = \frac{\xi C_{O_2} q k_{\text{кр}} R_{\text{ср}}^2}{\rho c_V T_c a}. \quad (12)$$

Долю реакционной поверхности ξ , принимающей участие в окислении, различных органических веществ установим из зависимости величины ξ от плотности этих веществ:

$$\xi = 1,145\rho^{-0,68}. \quad (13)$$

Переходим к расчету комплексного показателя \bar{t} и инкубационного периода самовозгорания органического вещества для случая теплообмена с окружающей средой по формуле

$$t_{\text{инк}}|_{Vi \neq 0} = \frac{\ln\left[-\left(\frac{T_{\text{кр}}}{T_0} - 1 - \frac{1}{b}\right)b\right]}{b} \frac{\rho c_V T_0}{\xi C_{O_2} q_1 k_{\text{кр}}} \quad (14)$$

\bar{t}	B
-----------	-----

при условии $T_0 > 343 \text{ К (70 } ^\circ\text{C)}$.

Значения теплофизических характеристик муки костной и других органических веществ растительного происхождения, размещенных в штабеле с $R_{\text{ср}} = 2 \text{ м}$, промежуточные расчеты и результаты вычислений инкубационного периода представлены в табл. 2.

Как отмечалось ранее, после гибели микроорганизмов температура некоторое время изменяется незначительно, а далее начинается процесс химического окисления, инкубационный период которого 5 сут (см. табл. 2).

Таблица 2

Экспериментальные значения тепловых характеристик органических веществ растительного происхождения и их параметры пожарной опасности в штабеле ($r = 2$ м)

Органический материал (вещество)	$q \cdot 10^{-6}$, Дж/моль	$k_{кр} \cdot 10^4$, с ⁻¹	$T_{кр}$, К	ρ , кг/м ³	c_v , Дж/(кг·К)	λ , Вт/(м·с)	$a \cdot 10^7$, м ² /с	ξ	α , Вт/(м·К)	$B \cdot 10^{-6}$, с	\bar{t}	t , сут	Группа
													эндоген. пожаро-опасности
Опилки сосновые	7,664	1,094	499	260	1200	0,054	1,731	0,026	0,009	0,523	0,376	2,3	III
Дрожжи кормовые	2,352	9,646	478	300	920	0,066	2,391	0,024	0,010	1,883	0,337	7,3	III
Дрожжи товарные (влажн. 8 %)	1,725	7,711	463	220	920	0,043	2,125	0,029	0,008	1,907	0,304	6,7	II
Дрожжи товарные(влажн. 15 %)	1,960	9,986	463	250	980	0,054	2,204	0,027	0,009	1,711	0,304	6,0	II
Мука ржаная	5,135	1,274	492	655	1050	0,152	2,210	0,014	0,021	2,766	0,368	11,8	III
Мука костная (крупнозерн.)	5,174	1,853	463	660	780	0,14	2,720	0,014	0,020	1,420	0,303	5,0	II
Пыль костной муки	5,174	1,706	442	660	780	0,20	3,885	0,014	0,027	1,543	0,257	4,6	II
Сено	0,549	7,644	495	70	800	0,024	4,286	0,064	0,005	0,077	0,367	0,3	III
Силос	1,780	7,947	468	227	880	0,048	2,403	0,029	0,008	1,808	0,316	6,6	II
Хлопок	31,36	1,006	490	420	1550	0,025	2,076	0,019	0,005	0,074	0,357	0,3	III

Анализ значений комплексного показателя \bar{t} показывает, что рассмотренные органические вещества растительного происхождения относятся к группам пожароопасных и малоопасных. Следует отметить, что влияние размера скопления на определение пожароопасных факторов для органического вещества проявляется в большей степени, чем для угля. Поэтому классификация табл. 2 правомерна для заданных условий размещения веществ с учетом активного размножения микроорганизмов, приводящего к разогреванию веществ до 343 К.

Вывод. Разработан универсальный комплексный показатель \bar{t} пожароопасности веществ и предложен способ его расчета для угля и органических веществ растительного происхождения.

Список литературы / References

1. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 792 с. – ISBN 978-617-579-833-1.

Pashkovskiy, P.S. *Endogennyye pozhary v ugolnykh shakhtakh* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, 2013, Knowledge Publ., 792 p. – ISBN 978-617-579-833-1.

2. Определение группы пожароопасности пластов / С.П. Греков, П.С. Пашковский, И.Н. Зинченко, Е.А. Головченко // Уголь Украины. – 2008. – № 8. – С. 25 – 26.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., Zinchenko, I.N., Golovchenko, Ye.A. *Opredeleniye gruppy pozharoopasnosti plastov* [Determination of the fire hazard group of the seams]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2008, no. 8, pp. 25 – 26.

3. Гаврилов, А.В., Корольченко, И.А. Способ оценки возможности микробиологического самовозгорания продукции на объектах хранения // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – Т. 4, № 2(14). – С. 219 – 228.

Gavrilov, A.V., Korol'chenko, I.A. *Sposob otsenki vozmozhnosti mikrobiologicheskogo samovozgoraniya produktsii na obyektakh khraneniya* [Method of assessment of the possibility of the microbiological spontaneous ignition of the products on the storage objects]. *Izvestiya MGTU "MAMI"* [Proceedings of the MGTU "MAMI"]. 2012, vol. 4, no. 2(14), pp. 219 – 228.

4. Горшков, В.И. Самовозгорание веществ и материалов. – М.: ВНИИПО, 2003. – 444 с.

Gorshkov, V.I. *Samovozgoraniye veshchestv i materialov* [Spontaneous combustion of substances and materials]. VNIIPPO Publ., 2003, 444 p.

5. Bower, P.C. Self-heating evaluating and controlling the hazards. – London, 1984. – 500 p.

6. Пашковский, П.С., Греков, С.П., Орликова, В.П. Минимальное скопление органического материала, подверженного самовозгоранию // Уголь Украины. – 2016. – № 1. – С. 23 – 27.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Orlikova, V.P. *Minimal'noye skopleniye organicheskogo materiala, podverzhennogo samovozgoraniyu* [The minimum accumulation of the organic material liable to the spontaneous combustion]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2016, no. 1, pp. 23 – 27.

7. Греков, С.П., Орликова, В.П. Особенности теплоотдачи при очаговом самонагревании органических материалов // Уголь Украины. – 2015. – № 6. – С. 40 – 43.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P. *Osobennosti teplootdachi pri ochagovom samonagrevanii organicheskikh materialov* [Peculiarities of heat transfer by the seat spontaneous heating of organic materials]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2015, no. 6, pp. 40 – 43.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 07.04.2016

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: obep.niigd@list.ru;
Pyetr Semyenovich Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director on science; e-mail: niigd@mail.ru;
Aleksandr Aleksandrovich Vsyakiy, senior scientific associate; e-mail: sentyabr.eger@inbox.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, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-13-52

THE UNIVERSAL COMPLEX INDEX OF THE SPONTANEOUS FIRE HAZARD OF ORGANIC SUBSTANCES

Purpose. Working-out the complex fire hazard index of the solid organic substances to determine their liability to spontaneous combustion, fire hazard group, incubation period, threshold value of the criterion of estimation of liability to spontaneous combustion.

Methods. Analysis and generalization of investigations of chemical activity of various solid organic substances, critical temperatures of their spontaneous combustion, places of origin of spontaneous fires and their dimensions, heat transfer conditions.

Results. It is proposed to use the mathematical model of the heterogeneous oxidation of coals taking into account moisture evaporation and methane throttling to work out the complex index of the spontaneous fire hazard of various organic substances. It is shown that constant of oxidation reaction rate and moisture evaporation, heat of methane throttling, gas content of the seam, heat of moisture evaporation, Bi-criterion and oxygen content in coal influence essentially on the temperature change of the substances. The dependence was received to determine the complex fire hazard index taking into account the heat emission and its transfer being used for various solid organic substances. The parameters of differentiation of the mine seams in accordance with fire hazard groups on the basis of the mathematical model and data about more than 200 accidents occurred were substantiated. The dependences were ascertained to determine the threshold value of the fire hazard complex index of various solid substances of organic origin.

Practical value. The dependences received may be used to determine the spontaneous fire hazard of coal seams and solid substances of organic origin.

Conclusions. The new complex index of the spontaneous fire hazard of the solid substances of organic origin that allows determining critical value of the fire-hazardous accumulation, threshold values of the criterion of liability to spontaneous combustion, incubation period, fire hazard group on the basis of the laboratory analysis data was worked out.

Keywords: *spontaneous combustion; critical temperature; critical thickness of the accumulation; incubation period; group of the spontaneous fire hazard.*

УДК 519.614:614.841.12

Валерий Владимирович Мамаев, д-р техн. наук, замдиректора по научной работе;

e-mail: niigd@mail.ru;

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-70-29;

Анастасия Юрьевна Артёмова, канд. эконом. наук, доц.; e-mail: bgdicz_artjomova@mail.ru;

Институт гражданской защиты Донбасса;

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 337-17-33; 304-59-71

ТЕМПЕРАТУРА ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ШАХТНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Установление закономерностей изменения температуры воспламенения твердого горючего материала при обтекании его ламинарным высокотемпературным воздушным потоком и термическом разложении.

Методы. Используются приближенные методы решения уравнений при расчете температуры воспламенения некоторых шахтных материалов.

Результаты. Установлены характерные изменения температуры воспламенения шахтных горючих материалов в зависимости от скорости воздушного потока и концентрации кислорода.

Научная новизна. Разработан алгоритм расчета температуры воспламенения шахтного горючего материала и впервые получены изменения ее значения в зависимости от скорости воздушного потока и концентрации кислорода.

Ключевые слова: температура воспламенения; скорость потока; концентрация кислорода; твердый материал; численные исследования.

Постановка задачи. Температура воспламенения – один из основных показателей, характеризующих пожарную опасность материала, определяется экспериментальными методами согласно действующим нормативным документам. Однако она не является величиной постоянной для материала, а изменяется в зависимости от условий его эксплуатации, в частности, от скорости воздушного потока и концентрации кислорода. Проведены теоретические исследования термодинамических процессов в твердом материале при нагревании его высокотемпературным воздушным потоком и установлена зависимость температуры воспламенения и времени индукции от условий в горной выработке [1]. Данная зависимость является трансцендентным уравнением относительно температуры воспламенения θ_w^* , решается численным методом и позволяет исследовать влияние скорости реакции термического разложения, теплофизических свойств материала и гидродинамики потока на воспламеняемость материала. В настоящей работе представлены результаты продолженных исследований температуры воспламенения материалов.

Изложение основного материала исследований. Как уже отмечалось, полученное выражение для расчета θ_w^* является трансцендентным уравнением и в безразмерном виде выражается следующей зависимостью:

$$\theta_w^* = \theta_{s0} + \frac{\theta_{\Pi} - \theta_w^* + I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^*}{I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^* - 1},$$

где θ_{s0} – температура материала в начальный момент при $\tau = 0$;

θ_{Π} – температура воздушного потока;

C_w – концентрация кислорода на поверхности материала;

x – продольная координата;

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

Pr – число Прандтля;

f – функция, характеризующая ламинарный воздушный поток.

Полученное выражение для определения величины θ_w^* решалось при $\theta_{s0} = 0$. Тогда уравнение примет вид

$$\theta_w^* - \frac{\theta_{\Pi} - \theta_w^* + I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^*}{I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^* - 1} = 0. \quad (1)$$

Прежде чем приступить к решению уравнения (1), вычислим значение интеграла I^* , входящего в него в качестве параметра. Для этого необходимо найти значение функции

$$F_1(\eta) = \int_0^{\eta} f(u) du$$

при каждом η , $0 < \eta < +\infty$. Значения функции $f(u)$ на промежутке $[0; 8,8]$ с шагом $h = 0,2$ приведены в работе [2]. Кроме того, известно, что $f'(u) > 1$ при $u \rightarrow +\infty$. Учитывая этот факт, а также то, что при $8 \leq u \leq 8,8$ приращение $f(u)$ равно приращению аргумента (это видно по приведенным в [2] таблице значениям $f(u)$), можем считать $f(u)$ линейной при $u \geq 8$, то есть

$$f(u) = u - 1,72077. \quad (2)$$

Обозначим $\eta_k = 0,2k$; $k = 0, 1, 2, \dots$. Вычислим $F_1(\eta)$ по формуле прямоугольников, разбивая промежуток $[0; \eta]$ точками η_k на более мелкие и принимая в качестве узлов интегрирования вначале левые концы отрезков $[\eta_k, \eta_{k+1}]$, а затем правые. Пусть $\eta_m \leq \eta \leq \eta_{m+1}$. Учитывая монотонное возрастание функции $f(u)$, имеем

$$\begin{aligned}
 F_1(\eta) &= \int_0^\eta f(u)du = \sum_{k=0}^{m-1} \int_{\eta_k}^{\eta_{k+1}} f(u)du + \int_{\eta_m}^\eta f(u)du \geq \\
 &\geq \sum_{k=0}^{m-1} f(\eta_k)(\eta_{k+1} - \eta_k) + f(\eta_m)(\eta - \eta_m) = 0,2 \sum_{k=1}^{m-1} f(\eta_k) + f(\eta_m)(\eta - \eta_m) \quad (3)
 \end{aligned}$$

и аналогично

$$\begin{aligned}
 F_1(\eta) &\leq \sum_{k=0}^{m-1} f(\eta_{k+1})(\eta_{k+1} - \eta_k) + f(\eta_{m+1})(\eta - \eta_m) = \\
 &= 0,2 \sum_{k=1}^{m-1} f(\eta_{k+1}) + f(\eta_{m+1})(\eta - \eta_m). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Здесь несколько модифицирована формула прямоугольников, узел η заменен узлом η_{m+1} . Вычислим теперь интеграл I^* , используя формулы (3) и (4). Будем полагать $\xi = \text{Pr}/2$. Тогда

$$\begin{aligned}
 I &= \int_0^{0,2} \exp[-\xi F_1(\eta)]d\eta + \sum_{m=1}^{\infty} \int_{\eta_m}^{\eta_{m+1}} \exp[-\xi F_1(\eta)]d\eta \leq \\
 &\leq 0,2 + \sum_{m=1}^{\infty} \exp \left[-0,2\xi \sum_{k=1}^{m-1} f(\eta_k) \right] \int_{\eta_m}^{\eta_{m+1}} \exp[-\xi f(\eta_m)(\eta - \eta_m)]d\eta = \\
 &= 0,2 + \frac{1}{\xi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{f(\eta_m)} \{1 - \exp[-0,2\xi f(\eta_m)]\} \times \exp \left[-0,2\xi \sum_{k=1}^{m-1} f(\eta_k) \right].
 \end{aligned}$$

С другой стороны,

$$\begin{aligned}
 I &\geq \sum_{m=0}^{\infty} \exp \left[-0,2\xi \sum_{k=1}^{m-1} f(\eta_{k+1}) \right] \int_{\eta_m}^{\eta_{m+1}} \exp[-\xi f(\eta_{m+1})(\eta - \eta_m)]d\eta = \\
 &= \frac{1}{\xi} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{f(\eta_{m+1})} \{1 - \exp[-0,2\xi f(\eta_{m+1})]\} \times \exp \left[-0,2\xi \sum_{k=0}^{m-1} f(\eta_{k+1}) \right] = \\
 &= \frac{1}{\xi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{f(\eta_m)} \{1 - \exp[-0,2\xi f(\eta_m)]\} \times \exp \left[-0,2\xi \sum_{k=1}^{m-1} f(\eta_k) \right].
 \end{aligned}$$

Из полученных выражений видно, что оценки для интеграла I сверху и снизу отличаются на 0,2; поэтому с абсолютной погрешностью не более 0,1 можно считать, что

$$I = 0,1 + \frac{1}{\xi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{f(\eta_m)} \{1 - \exp[-0,2\xi f(\eta_m)]\} \exp \left[-0,2\xi \sum_{k=1}^{m-1} f(\eta_k) \right] =$$

$$= 0,1 + \frac{1}{f(\eta_1)} + \frac{1}{\xi} \sum_{m=2}^{\infty} \left[\frac{1}{f(\eta_m)} - \frac{1}{f(\eta_{m-1})} \right] \exp \left[-0,2\xi \sum_{k=1}^{m-1} f(\eta_k) \right]. \quad (5)$$

Таким образом, получили соотношение (5), позволяющее вычислять с помощью ЭВМ значение интеграла I^* . При этом относительная погрешность оказывается в пределах 1 – 2 %, в зависимости от получаемых значений I^* .

Для непосредственного решения уравнения (1) преобразуем его следующим образом:

$$\theta_w^* I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^* - \theta_w^* - \theta_{\Pi} + \theta_w^* - I^* \sqrt{x} C_w \exp \theta_w^* = 0;$$

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

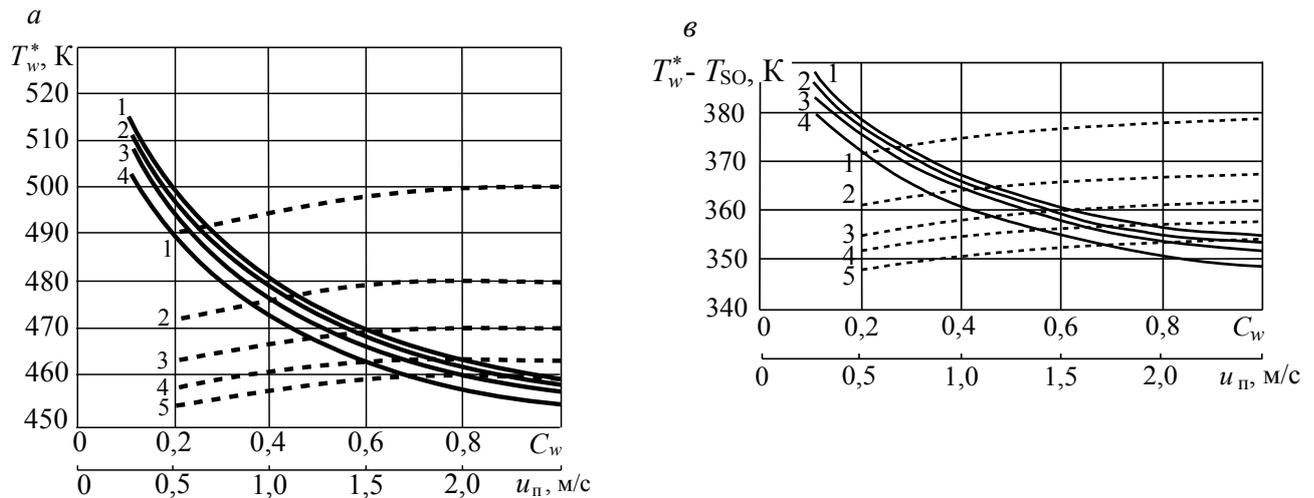
Положим $\theta_w^* - 1 = z$. Тогда уравнение (1) можно записать в виде

$$z \exp z = A, \quad (6)$$

где $A = \theta_{\Pi} / (I^* \sqrt{x} C_w e)$.

Правая часть уравнения (6) – положительна. Тогда следует, что и $z > 0$, то есть корень трансцендентного уравнения (6) является действительным в выбранном интервале $[0; 60]$. Так как производная этой функции также является положительной в этом интервале, то этот корень – единственный. Вычисление на ЭВМ действительного корня уравнения (6) внутри интервала производится обращением к библиотеке стандартных подпрограмм.

В качестве примера выполнен расчет температуры воспламенения обкладок резиноканевой конвейерной ленты и древесины, которые нагреваются высокотемпературным воздушным потоком (см. рисунок).



Изменение температуры воспламенения T_w^* древесины (а) и обкладок конвейерной ленты (б) в зависимости от скорости воздушного потока u_n и объемной доли кислорода C_w :

сплошная линия – объемная доля 1 – при $u_n = 2,0$ м/с; 2 – при $u_n = 1,5$ м/с;
 3 – при $u_n = 1,0$ м/с; 4 – при $u_n = 0,5$ м/с;
 штриховая линия – скорость потока 1 – при $C_w = 0,2$; 2 – при $C_w = 0,4$;
 3 – при $C_w = 0,6$; 4 – при $C_w = 0,8$; 5 – при $C_w = 1,0$

Для расчета использованы значения теплофизических коэффициентов материалов и воздуха из литературных источников. При этом предполагалось, что обкладка конвейерной ленты представляет собой однородный материал из твердой резины, а наличие в ней антипиренов влияет лишь на протекание гетерогенной реакции. В связи с тем, что значения кинетических характеристик реакции термоокислительной деструкции таких резин в научной литературе отсутствуют, проведены экспериментальные исследования и определены числовые значения скорости и константы скорости химической реакции, а также энергии активации [3].

Выводы. В результате численных исследований температуры воспламенения горючих материалов впервые установлен характер изменения значений ее в зависимости от скорости высокотемпературного воздушного потока и концентрации кислорода.

Список литературы / References

1. Мамаев, В.В. Моделирование термодинамических процессов в твердых материалах при нагревании высокотемпературным воздушным потоком // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 2(53) – С. 53 – 63.

Mamayev, V.V. *Modelirovaniye termodinamicheskikh protsessov v tvyerdykh materialakh pri nagrevanii vysokotemperaturnym vozdushnym potokom* [Simulation of thermodynamic processes in solid materials when heating by means of the high-

temperature air flow]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch. tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. – Donetsk, 2016, no. 2 (53), pp. 53 – 63.

2. Шлихтинг, Г. Теория пограничного слоя. – М.: Наука, 1974. – 711 с.

Shlikhting, G. *Teoriya pogranichnogo sloya* [Theory of the boundary layer]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 711 p.

3. Мамаев, В.В. Определение кинетических показателей термодеструкции горючих материалов // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 3(53) – С. 47 – 56.

Mamayev, V.V. *Opredeleniye kineticheskikh pokazateley termodestruksii goryuchikh materialov* [Determination of the kinetic characteristics of thermodestruction of combustible materials]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch. tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. – Donetsk, 2016, no. 3 (53), pp. 47 – 56.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 09.08.2016

*Valeriy Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director on science; e-mail: niigd@mail.ru;
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DNR;*

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-70-29;

*Anastasia Yur'yevna Artyemova, Cand. Sci. (Econ.), associate professor;
e-mail: bgdicz_artyomova@mail.ru;*

The Institute of the Civil Protection of the Donetsk Basin;

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyema. Phones (+38 062) 337-17-33; (+38 062) 304-59-71

THE IGNITION TEMPERATURE OF MINE COMBUSTIBLE MATERIALS

Purpose. Establishment of conformities of change of the ignition temperature of the solid combustible material by its flow with the laminar high-temperature air flow and thermal decomposition.

Methods. The approximate methods of solution of the equations are used by calculation of the ignition temperature of some mine materials.

Results. The characteristic changes of the ignition temperature of the mine combustible materials are established depending on the air flow rate and oxygen concentration.

Scientific novelty. The algorithm of calculation of the ignition temperature of the mine combustible material was worked out, and the changes of its value depending on the air flow rate and oxygen concentration were received for the first time.

Keywords: *ignition temperature; flow rate; oxygen concentration; solid material; numerical investigations.*

УДК [614.841.2:663.974]:343.148

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;

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, г. Донецк, ул. Артёма, 157. Тел. (+38 062) 311-39-91*

РАЗВИТИЕ ПОЖАРА ОТ ИСТОЧНИКА ЗАЖИГАНИЯ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Цель. Изучение причин возгорания твёрдых горючих веществ и материалов от маломощного источника зажигания.

Метод. Экспериментальные испытания фрагментов, изъятых с места пожара, по показателям пожарной опасности. Теоретическое обоснование процессов возникновения тления и перехода в пламенное горение.

Результаты. На основании экспериментальных и теоретических данных установлена причастность маломощного источника зажигания (тлеющего табачного изделия) к возникновению пожара.

Практическая значимость. Результаты исследований используют при проведении пожарно-технических экспертиз, связанных с возникновением пожаров от маломощных источников зажигания.

Ключевые слова: источник зажигания малой мощности; тлеющее табачное изделие; тление; горение; температура воспламенения; температура тления; тепловая инерция.

Постановка проблемы. Анализ статистических данных о 12 286 пожарах, которые произошли в жилом секторе Москвы в 2015 г., показывает, что более трети из них (35,4 %) возникло из-за непотушенных сигарет. Пожары такого рода приводят к гибели людей и причиняют существенный экономический и материальный ущерб обществу. Так, в США ежегодно при пожарах, происшедших из-за непотушенных сигарет, погибает около 900 человек, а причиняемые убытки от таких пожаров оцениваются в 400 млн долларов.

Наибольшее количество пожаров по этой причине происходит, как правило, в жилых домах, квартирах, бытовых, производственных и складских помещениях. Масштабные возгорания, потушить которые нелегко, в жилом секторе чаще всего наблюдаются на балконах и лоджиях, где могут быть сосредоточены твёрдые вещества, легковоспламеняющиеся жидкости, старые вещи, которые склонны к тлению и горению.

При этом, как показано в работах [1-3], наиболее распространённым тепловым источником возникновения пожара является тлеющее табачное изделие. В процессе тления различных горючих веществ и материалов генерируется относительно небольшое количество теплоты и горючих

компонентов, поэтому опасность тления с точки зрения теплового воздействия значительно ниже, чем при пламенном горении, вызванном достаточно мощным источником зажигания, и при поджогах с применением инициаторов горения.

Однако процесс тления веществ и материалов различного химического состава сопровождается образованием значительного количества продуктов неполного их окисления. Образующиеся соединения представляют собой более токсичные, по сравнению с высшими оксидами, вещества, способные к дальнейшему горению в виде газозводушных смесей. При этом на месте пожара возникают вторичные процессы (пробежка пламени по поверхности, общая вспышка), которые могут привести к образованию дополнительных очагов горения.

Как правило, пожары, протекающие через стадию тлеющего горения, характеризуются длительным периодом развития, сопровождаются значительным выделением токсичных веществ, что приводит к отравлению и гибели людей. Именно с этим связана актуальность исследований подобных пожаров.

Анализ последних исследований. Проблемы исследования пожаров, в том числе связанных с маломощными источниками теплоты (табачные изделия, парафиновая свеча и др.), теоретические аспекты оценки, классификации, изучения возникновения и развития пожаров, особенности процесса горения в виде тления нашли отражение в работах [1-3].

Тление представляет собой процесс низкотемпературного диффузионного горения пористого слоя твёрдых горючих (или жидких горючих на твёрдых носителях) веществ и материалов, без появления пламени. В зависимости от условий процесса тления эта стадия может перейти (при достаточном количестве окислителя) или не перейти в стадию пламенного горения. Возможность возгорания твёрдых веществ и материалов от источника зажигания зависит от его тепловой мощности, продолжительности теплового воздействия, геометрических размеров образца (толщины, дисперсности), подвергающегося такому воздействию, условий окружающей среды: температуры, влажности и скорости потока воздуха.

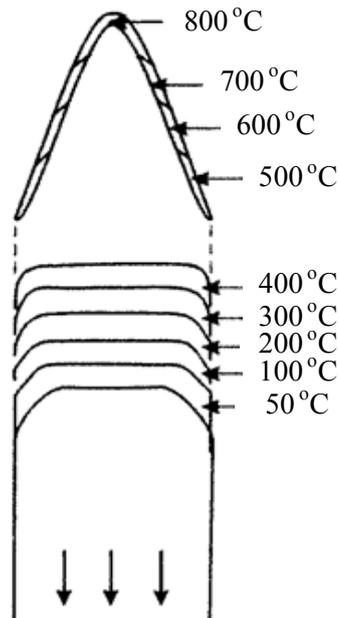
Тлеющие табачные изделия по запасу выделяющейся тепловой энергии относятся к маломощным источникам зажигания: тепловой поток от тлеющей сигареты 6,7...13,3 Вт [2], что достаточно для появления признаков тления.

Процесс тления табачных изделий является следствием окисления углерода и водорода до продуктов, которые не способны больше гореть: диоксида углерода и паров воды. Объемная доля углерода в ферментированном табаке 45 % [4].

Пожарная опасность табачных изделий определяется, главным образом, температурой и временем тления, которые определяют их зажигающую способность при контакте с твёрдыми горючими материалами. Температура и время тления зависят, кроме интенсивности потока воздуха к зоне очага тления, также от теплофизических свойств табака и бумаги. Сигареты высшего качества и сорта изготавливают из бумаги, содержащей до 100 % льняного

волокна, и обладают хорошей тлеющей способностью. Установлено, что сигареты высшего и первого сорта имеют длительность тления в пределах 18...27 мин, сигареты второго сорта и папиросы первого сорта менее склонны к этому процессу и тлеют всего 4...5 мин [4].

Следует отметить, что при тлении сигареты развиваются высокие температуры, распределение которых показано на рисунке [5].



Распределение температур на конусообразном конце тлеющей сигареты

В момент, когда сигарету раскуривают (поджигают), температура маленького огонька на её кончике может достигать до 700...800 °С, при курении, когда сигарета просто горит 600 °С. Табак в сигарете не горит, а тлеет и температура тления может быть в пределах от 300 до 500 °С [5]. Горячая сигарета нагревает материалы, с которыми контактирует, что может привести к началу их тления и последующему возгоранию и стать причиной пожара.

Важнейшими задачами при расследовании пожаров, связанных с маломощным источником зажигания, являются выяснение динамики процесса тления и развития горения, установление условий, при которых возможен процесс тления и времени перехода тления в пламенное горение. Рассмотрим последовательно решение и практическое применение каждой из этих задач.

К основным параметрам, определяющим динамику пожара, характерную для маломощных источников зажигания, относятся температура, время и скорость распространения процесса тления. Температура тления находится в пределах 150...400 °С и не превышает 600 °С, что в 2...2,5 раза ниже обычных температур диффузионного горения твёрдых веществ и материалов [4].

Температура и время перехода процесса тления в пламенное горение для различных твёрдых веществ и материалов определяется линейной скоростью распространения процесса тления в материале. Линейная скорость

распространения тления вверх (например, по занавесям, шторам, жалюзи и др.) имеет тенденцию превосходить скорость распространения в горизонтальном направлении.

Существует несколько эмпирических закономерностей, касающихся линейной скорости распространения тления. Согласно одной из них [6] линейную скорость распространения тления можно рассчитать по уравнению

$$u = \frac{n a c \rho P_+(T)}{\Psi \alpha \Delta(T)}, \quad (1)$$

где n – относительный тепловой градиент;

a – коэффициент температуропроводности, м²/с;

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

ρ – плотность, кг/м³;

$P_+(T)$ – температурная зависимость адиабатической скорости самонагрева в центре очага горения, К/с;

Ψ – критерий неравномерности нагрева;

α – коэффициент тепловой отдачи, Вт/(м² · К);

$\Delta(T) = T_3 - T_n$ – разность температур между точками T_3 (температура зажигания, вызывающая тление) и T_n (начальная температура), К.

Объёмную скорость тепловыделения в зоне тления Q_V^1 и тепловой поток q^1 определяют зависимостями [6]

$$Q_V^1 = c \rho P_+(T); \quad (2)$$

$$q^1 = \Psi \alpha \Delta T. \quad (3)$$

С использованием этих уравнений формулу (1) запишем следующим образом:

$$u = n a Q_V^1 / q^1. \quad (4)$$

Из приведённого уравнения следует, что линейная скорость распространения тления определяется относительным тепловым градиентом, коэффициентом температуропроводности, объёмной скоростью тепловыделения в зоне тления и тепловым потоком от зоны тления в окружающую среду.

Коэффициент температуропроводности, физический параметр материала (вещества), характеризующий скорость изменения его температуры в неравновесных тепловых процессах, определяют по формуле

$$a = \frac{\lambda}{c \rho}, \quad (5)$$

где λ – теплопроводность, Вт/(м · К);

c – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К);
 ρ – плотность, кг/м³.

Из формул (1) и (4) видно, что линейная скорость распространения тления зависит от теплофизических характеристик и природы самого вещества и материала, обуславливающих процесс переноса теплоты и условий ее накопления, т.е. изменения температуры в веществах и материалах.

Время перехода тления в пламенное горение определяется способностью материала воспринимать теплоту, которая может быть выражена произведением показателей его физических свойств: теплопроводности λ , удельной теплоёмкости c и плотности ρ [5]. Произведение $\lambda c \rho$ характеризует тепловую инерцию материала, т.е. способность материала сопротивляться нагреванию без изменения химической структуры. Чем она больше, тем труднее материал загорается и меньше скорость распространения его горения. Указанная характеристика может служить в качестве одного из критериев оценки пожарной опасности различных горючих твёрдых веществ и материалов.

Способность к тлению веществ и материалов, кроме природы и теплофизических характеристик, существенно определяется их структурой (пористостью).

Пористость материала обеспечивает наибольшую вероятность его вовлечения в процесс тления. Только пористые вещества и материалы, образующие при нагревании углистый остаток, могут самостоятельно поддерживать тлеющее горение. Через открытые поры воздух достигает фронта горения, обеспечивая его развитие. И, наоборот, закупоривание пор, происходящее при плавлении или образовании смолистых продуктов, способствует прекращению тления. По этой причине термопластичные материалы (полиэтилен, полистирол, полиакрилат, полиамид, поликарбонат и др.), плавящиеся при нагревании или образующие при разложении малоуглеродистый остаток, не подвержены тлению.

Одним из важных условий устойчивого распространения процесса тления является концентрация окислителя (кислорода) в окружающей среде. Как было показано американскими исследователями, скорость тления практически пропорциональна концентрации кислорода. При изменении объемной доли кислорода от 21 до 96 % линейная скорость тления увеличивалась примерно в 3 раза [6].

Увеличение влажности материала приводит к снижению скорости тления, так как на испарение влаги расходуется теплота, выделяющаяся в зоне горения.

Цель исследования. Изучение динамики процесса тления и развития горения, условий, при которых возможен процесс тления, и определение времени перехода тления в пламенное горение от такого маломощного источника зажигания, как тлеющее табачное изделие.

Материалы и результаты исследований. Непотушенные окурки, брошенные с балконов, лоджий или окон, могут спровоцировать пожар, попав

на балконы или лоджии нижерасположенных этажей, где часто в избытке хранятся материалы, склонные к тлению: старые вещи, книги, газеты, картонные коробки, игрушки и т.д.

Показательным в этом отношении является пожар, который произошёл 21 июля 2015 г. в городе Донецке на балконе в одной из квартир, расположенной на шестом этаже девятиэтажного жилого дома.

После осмотра места происшествия было установлено, что хозяева квартиры на открытом балконе хранили детские пластмассовые и резиновые игрушки, старые вещи из различных горючих материалов. По предварительной версии причиной пожара стал непотушенный окурок сигареты, брошенный с верхних этажей.

Для установления возможности возникновения пожара от тлеющего табачного изделия была проведена серия испытаний по определению температурных показателей пожарной опасности фрагментов, представленных на исследования (см. таблицу): коврика и ткани из текстильного материала и плетёной корзины (материал растительного происхождения).

Результаты исследований пожарной опасности фрагментов, изъятых с места пожара

Образец (материал)	Температура воспламе- нения, °С	Температура самовоспламе- нения, °С	Темпера- тура тления, °С	Тепловая инерция материала $\lambda c \rho$, кДж ² /(с·м ⁴ ·°С ²)
Фрагмент коврика (текстильный материал)	255	405	285	47,2
Фрагмент ткани (текстильный материал)	225	425	235	12,6
Фрагмент плетёной корзины (древесная целлюлоза)	245	465	295	86,8

Значения температуры воспламенения и тления испытанных образцов меньше температуры тления сигареты (300...500 °С), что свидетельствует о возможности воспламенения этих материалов при контакте с тлеющим табачным изделием.

Кроме температурных показателей пожарной опасности, при установлении причины пожара учитывали комплекс причин, достаточных для возникновения процесса тления и перехода в пламенное горение: накопление теплоты в системе, время перехода тления в пламенное горение, тепловую инерцию материалов и их структуру.

Степень накопления теплоты и как следствие подъём температуры материала до температуры его воспламенения – основной фактор, определяющий время наступления пламенного горения.

Развитие тления, при котором происходит значительное увеличение температуры материала, возможно только при условии накопления теплоты в системе, т.е. превышения тепловыделения над потерями теплоты в окружающую среду. Параметром процесса, определяемым тепловыми потерями из зоны термического изменения материалов в окружающую среду, является разность температур между зоной термической окислительной реакции и окружающей средой. Отсюда следует вывод, что с возрастанием температуры окружающей среды скорость тления должна увеличиваться.

Объяснением этой зависимости является закон Ньютона-Рихмана, определяющий тепловую отдачу от нагретого тела в окружающую среду [7]:

$$q = \alpha \Delta T, \quad (6)$$

где q – плотность теплового потока, Вт/м²;

α – коэффициент тепловой отдачи, Вт/(м² · К);

ΔT – градиент температур, К.

Уменьшение градиента температур способствует аккумуляции теплоты в зоне реакции, повышая её температуру, что приводит к увеличению скорости химической реакции термического разложения (пиролиза) и окисления материала и как следствие к возрастанию скорости распространения фронта тления.

Аккумуляция теплоты возможна при нахождении очага тления на поверхности в складках материала либо внутри материала, на глубине, при которой доступно поступление кислорода и удаление летучих продуктов горения из очага тления.

В рассматриваемой ситуации с пожаром сформированы благоприятные условия, приводящие к пламенному горению. Очаг тления, с большой вероятностью, мог находиться в месте, доступном для поступления кислорода из открытого воздуха и удаления летучих продуктов горения из зоны тления. Это способствовало аккумуляции теплоты, нагреванию материалов выше их температур воспламенения и переходу процесса тления в пламенное горение.

Время перехода тления в пламенное горение оценивали по значению тепловой инерции материалов фрагментов, представленных на исследование. Температурные показатели пожарной опасности, а также наличие комплекса условий, необходимых и достаточных для возникновения тления и перехода в пламенное горение, показывают, что все испытанные образцы являются потенциальными источниками воспламенения. Однако можно утверждать, что среди фрагментов, представленных на исследования, наиболее пожароопасными являются образцы ткани и коврика, материал которых обладает более низкой тепловой инерцией. Для таких материалов характерны энергичное распространение пламени и быстрое развитие пожара.

Кроме того, материалы (текстильная ткань, материал растительного происхождения) фрагментов, изъятых с места пожара, обладают сложной

пористой структурой, состоящей из волокон и заполненных воздухом пор. Подобная структура обеспечивает свободный доступ кислорода воздуха к очагу тления. Этим самым осуществляется и поддерживается процесс самостоятельного тлеющего горения, являющегося промежуточной стадией перед возникновением пламенного горения.

На основании теоретических исследований и подтверждающих их экспериментальных данных можно сделать вывод о возможности воспламенения материалов, представленных на исследования, при контакте с тлеющим табачным изделием.

Выводы. Изучены условия, необходимые для возникновения процесса тления и перехода в пламенное горение от маломощного источника зажигания – тлеющего табачного изделия. Определены значения температурных показателей пожарной опасности и тепловой инерции (характеризующей время перехода тления в пламенное горение) для материалов различного состава, изъятых с места пожара. Среди них выявлены наиболее пожароопасные материалы, способные к тлению и возгоранию при контакте с тлеющей сигаретой. На основании экспериментальных и теоретических данных установлена причастность тлеющего табачного изделия к возникновению пожара.

Список литературы / References

1. Расследование пожаров / В.Е. Чирко, М.А. Савандюков, С.Е. Перцев, И.А. Попов: в 2 ч. – М.: ВНИИПО МВД РФ, 1993. Ч.1. – 176 с. Ч.2. – 132 с.

Chirko, V.Ye., Savandyukov, M.A., Pertsev, S.Ye., Popov, I.A. *Rassledovaniye pozharov: v 2 ch.* [Investigation of fires: in 2 parts]. Moscow, VNIPO MVD RF Publ., 1993. Part 1 – 176 p. Part 2 – 132 p.

2. Чешко, И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования). – СПб.: СПБИБ МВД РФ, 1997. – 562 с.

Cheshko, I.D. *Ekspertiza pozharov (obyekty, metody, metodiki issledovaniya)* [Expert examination of fires (objects, methods, methods of investigation)]. St. Petersburg, SPbIPB MVD RF Publ., 1997, 562 p.

3. Россинская, Е.Р. Судебная экспертиза в уголовном, гражданском, арбитражном процессе [Электронный ресурс]. – М., 1996. – 224 с. – URL: http://royallib.com/read/rosinskaya_elen/sudebnaya_ekspertiza_v_gragdanskom_arbitrazhnom_administrativnom_i_ugolovnom_protsesse.html#0 (дата обращения 17.03.2016).

Rossinskaya, Ye.R. *Sudebnaya ekspertiza v ugolovnom, grazhdanskom, arbitrazhnom protsesse* [Court expertise in the criminal, civil and arbitration procedure] (Electronic resource). Moscow, 1996, 224 p. Available at: URL: http://royallib.com/read/rosinskaya_elen/sudebnaya_ekspertiza_v_gragdanskom_arbitrazhnom_administrativnom_i_ugolovnom_protsesse.html#0 (Accessed 17.03.2016).

4. Исследование пожаров, связанных с источником малой мощности (в виде тлеющего табачного изделия). – Красноярск: СЭУ ФПС ИПЛ по Красноярскому краю, 2014. – 13 с.

Issledovaniye pozharov, svyazannykh s istochnikom maloy moshchnosti (v vide tleyushchego tabachnogo izdeliya) [Investigation of the fires associated with the low-power source (in the form of the smoldering tobacco product)]. Krasnoyarsk, CEU FPS IPL po Krasnoyarskomu Krayu Publ., 2014, 13 p.

5. Таубкин, С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М., 1999. – 600 с.

Taubkin, S.I. *Pozhar i vzryv, osobennosti ikh ekspertizy* [Fire and explosion, peculiarities of their examination]. Moscow, 1999, 600 p.

6. Киселёв, Я.С., Хорошилов, О.А., Демехин, Ф.В. Физические модели горения в пожарной безопасности / под общ. редакцией В.С. Артамонова. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. – 348 с.

Kiselyev, Ya.S., Khoroshilov, O.A., Demekhin, F.V., Artamonov, V.S. (ed.). *Fizicheskiye modeli goreniya v pozharной bezopasnosti* [Physical models of burning in fire safety]. St. Petersburg, Polytechnic University Publ., 2009, 348 p.

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

Korol'chenko, A.Ya. *Protsessy goreniya i vzryva* [Combustion and explosion processes]. Moscow, Pozhnauka Publ., 2007, 266 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 24.03.2016

Alexey 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;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-39-91

DEVELOPMENT OF A FIRE FROM A LOW-POWER IGNITION SOURCE

Purpose. Examination of causes of ignition of the solid combustion agents and materials from the low-power ignition source.

Method. Experimental tests of fragments taken from the fire place in accordance with the fire hazard indices. Theoretical substantiation of the processes of origin of the smoldering and transition to the flame burning.

Results. The participation of the low-power ignition source, i.e. the smoldering tobacco product, to origin of the fire was ascertained on the ground of experimental and theoretical data.

Practical value. The results of the investigations are used by carrying-out the fire-technical examinations connected with origin of the fires from the low-power ignition sources.

Keywords: *low-power ignition source; smoldering tobacco product; smoldering; combustion; ignition temperature; smoldering temperature; thermal inertia.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК [622.413.3:622.822]:51-3

Николай Викторович Карнаух, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: oavr@mail.ru;

Александр Викторович Мавроди, инж.; e-mail: mavrodi-av@mail.ru;

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-42-79; (+38 050) 283-61-87

РАСЧЕТ ТЕМПЕРАТУРЫ ПОЖАРНЫХ ГАЗОВ ЗА ОЧАГОМ ПОЖАРА

Цель. Расчет температуры воздуха за очагом пожара в горизонтальной выработке с использованием ПЭВМ.

Методы. Расчеты по эмпирическим зависимостям тепловых параметров вентиляционной струи при пожаре в горизонтальной выработке.

Результаты. Предложена программа реализации расчета температуры воздуха за очагом пожара в горизонтальной выработке на ПЭВМ с наглядным представлением результатов в виде графика изменения температуры воздуха по длине выработки.

Научная новизна. Программа расчета на ПЭВМ температуры пожарных газов позволяет быстро определить изменения ее по ходу движения вентиляционной струи.

Практическая значимость. Разработанная программа позволяет рассчитать температуру пожарных газов за очагом пожара, которая является основным параметром при выборе аварийного режима проветривания, местного реверсирования и мероприятий по спасению горнорабочих и обеспечению безопасности горноспасателей.

Ключевые слова: *пожар; горизонтальная выработка; температура пожарных газов; программа расчета; очаг.*

Постановка проблемы. Ведение очистных и подготовительных работ в сложных горно-геологических условиях, механизация и энерговооруженность шахт увеличивают вероятность подземных пожаров. Борьба с пожарами представляет одну из наиболее трудных и актуальных проблем безопасности в угольной промышленности ДНР [1].

Из общего количества ежегодно возникающих на угольных шахтах подземных пожаров более половины – экзогенные. Проблема повышения эффективности борьбы с подземными пожарами приобретает особую актуальность в связи с тем, что с появлением мощной добычной техники шахты разрабатывают угольные пласты столбами длиной до 3000 м, планируется увеличение последних до 4000 м. Только при этих условиях современная добычная техника может быть рентабельной.

Увеличение длины выемочных столбов ведет к значительному увеличению длины маршрутов для передвижения горняков и горноспасателей в не пригодной для дыхания среде. Кроме того, из-за большой протяженности горных выработок, по которым горноспасатели

движутся на помощь шахтерам, время их прибытия к пострадавшим может достигать 1...1,5 ч. За это время зона горения продвигается на 60...100 м, а температура пожарных газов по ходу вентиляционной струи резко возрастает, что не позволяет проводить аварийно-спасательные работы [2]. Высокая температура пожарных газов и скорость перемещения зоны горения существенно влияют на выбор аварийного вентиляционного режима.

НИИГД «Респиратор» разработал концепцию ведения работ на выемочных полях большой протяженности, в которой приведена методика определения температуры за очагом пожара. Для сокращения времени расчетов по этой методике и возникла необходимость разработки программного обеспечения.

Материалы и результаты исследований. Подземные пожары возникают неожиданно и действуют как правило в течение длительного периода времени до их ликвидации. Один из основных поражающих факторов пожаров – высокая температура пожарных газов. Она определяет возможность выхода горнорабочих на свежую струю в самоспасателях и передвижения горноспасателей в не пригодной для дыхания среде.

Для эффективного применения средств и способов тушения развившегося пожара, выбора аварийного режима проветривания участка в котором возник пожар, важно знать среднюю скорость перемещения зоны горения по выработке, максимальную и среднюю температуры пожарных газов в очаге горения и на удалении от него, длину зоны горящей крепи в выработке [1, 2, 3].

Основные исходные данные для расчетов:

- площадь поперечного сечения горной выработки (штрека);
- периметр выработки;
- скорость движения воздуха в выработке;
- температура боковых пород на глубине расположения выработки.

Максимальную температуру пожарных газов t_x на расстоянии x от места возникновения пожара определяем по формуле

$$t_x = t_{\Pi} + (t_0 - t_{\Pi}) e^{-\frac{\alpha \Pi}{0,24 C Q_{\text{в}}}(x - v_{\Pi} \tau)}, \quad (1)$$

где t_{Π} – температура боковых пород на глубине расположения выработки, °С;

t_0 – температура газов в очаге пожара, °С;

α – коэффициент, учитывающий теплоотдачу;

Π – периметр выработки, м;

C – теплоемкость воздуха, Дж/К; $C = 1,005$ кДж/К;

$Q_{\text{в}}$ – массовый расход воздуха, проходящего по выработке, кг/ч;

v_{Π} – средняя скорость перемещения зоны горения по ходу движения вентиляционной струи, м/ч; определяется по формуле (5);

τ – время с момента возникновения пожара, ч.

Определяем температуру газов $t_0, ^\circ\text{C}$, в очаге пожара (табл. 1):

$$t_0 = \frac{v}{0,00023 + 0,00065v}, \quad (2)$$

где v – скорость движения воздуха в выработке, м/с.

Таблица 1

Изменение температуры пожарных газов в зависимости от скорости движения воздуха в выработке

$v, \text{ м/с}$	0,25	0,5	1	2	3	4	5	6	8
$t_0, ^\circ\text{C}$	637	901	1136	1307	1376	1413	1437	1452	1473

Коэффициент, учитывающий теплоотдачу, α определяем по формуле

$$\alpha = 4,42 + 3,54v. \quad (3)$$

Массовый расход воздуха, проходящего по выработке, определяем по формуле

$$Q_B = 3600vS\gamma, \quad (4)$$

где S – площадь поперечного сечения горной выработки (штрека), м^2 ;

γ – средняя плотность воздуха в выработке, кг/м^3 .

Среднюю скорость перемещения зоны горения определяем по формуле

$$v_n = \frac{v}{0,0111 + 0,009v}. \quad (5)$$

График изменения скорости перемещения зоны горения по выработке в пределах допустимых Правилами безопасности скоростей представлен на рис. 1.

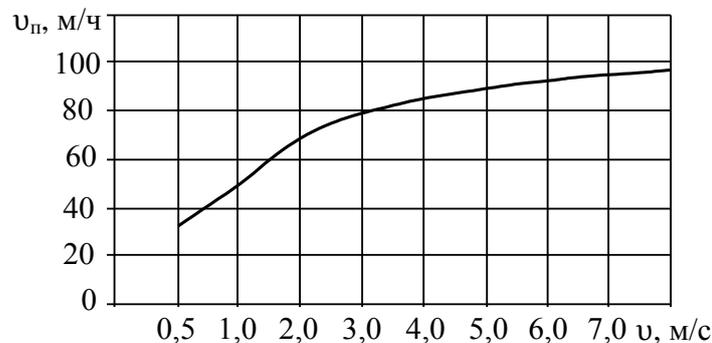


Рис.1. Зависимость скорости перемещения зоны горения по выработке от скорости движения вентиляционной струи

На рис. 2 представлено окно для ввода данных и расчета параметров определения температуры пожарных газов за очагом пожара. После выполнения расчетов нажатием на кнопку «Построить график» в окне программы расчета выводится на экран график изменения температуры пожарных газов в выработке на расстоянии до 1000 м. При необходимости интервал этих показаний может быть увеличен или уменьшен в зависимости от полученных результатов. Таким образом можно быстро определить температуру пожарных газов в данном интервале через заданный в исходных данных промежуток времени.

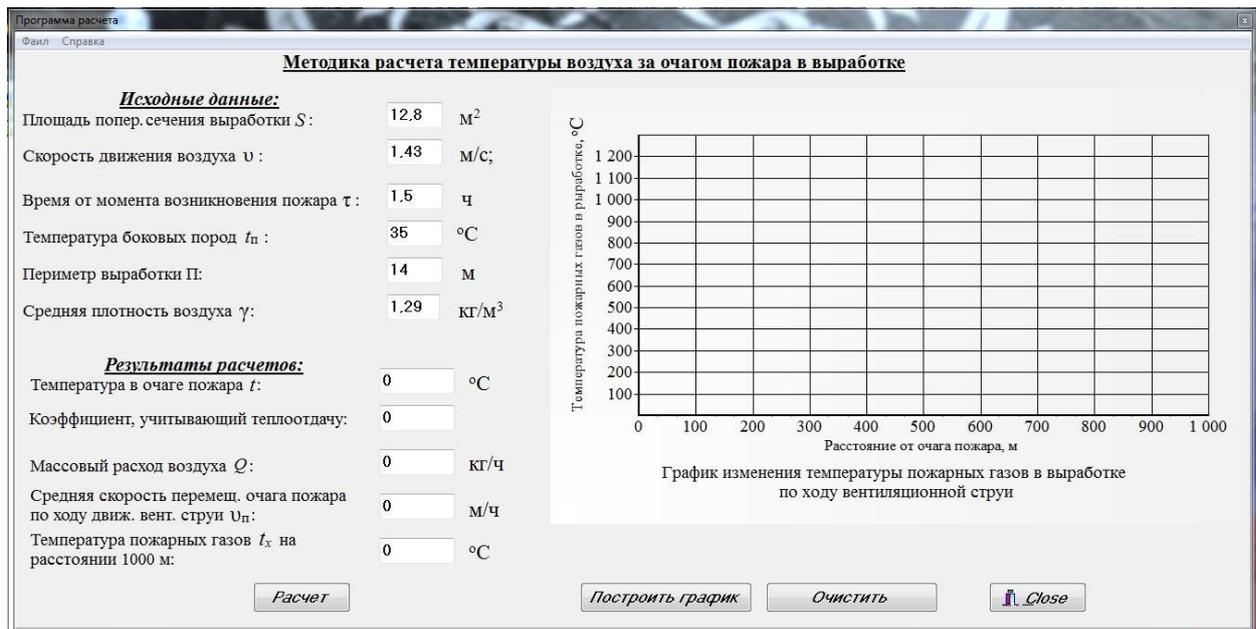


Рис. 2. Окно для ввода исходных данных и расчета параметров определения температуры пожарных газов за очагом пожара

После введения исходных данных, выполнения расчетов и построения графика доступен режим «Предварительный просмотр» отчета перед печатью, также можно экспортировать данные в текстовый документ MS Word или электронную таблицу MS Excel. Отчет состоит из таблиц:

- исходных данных (табл. 2);
- рассчитанных параметров (табл. 3);
- распределения температуры пожарных газов по длине выработки (табл. 4).

В табл. 2-4 приведены фактические данные расчета температуры пожарных газов за очагом пожара на примере шахты «Шахтерская – Глубокая» при пожаре на 2-м западном конвейерном штреке 2-й западной лавы пласта h_8 уклонного поля центрального блока.

Таблица 2

Исходные данные

Параметр	Значение
Площадь поперечного сечения выработки S , м ²	12,8
Скорость движения воздуха по выработке v , м/с	1,43
Время от момента возникновения пожара τ , ч	1,5
Температура боковых пород $t_{п}$, °С	35
Периметр выработки Π , м	14

Таблица 3

Результаты расчета

Параметр	Значение
Температура в очаге пожара t_0 , °С	1233
Коэффициент, учитывающий теплоотдачу, α	9,48
Массовый расход воздуха $Q_{в}$, кг/ч	85003
Скорость перемещения зоны горения по ходу движения вентиляционной струи $v_{п}$, м/ч	59
Температура пожарных газов t_x на расстоянии 1000 м, °С	38

Таблица 4

Распределение температуры пожарных газов в выработке по ходу движения вентиляционной струи

Расстояние от очага пожара, м	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Температура воздуха в выработке, °С	1154	619	340	194	118	78	58	47	41	38

Выводы. Разработанная программа расчета температуры воздуха за очагом пожара по ходу вентиляционной струи позволяет оперативно найти ее значения на обусловленном расстоянии x от очага пожара и наглядно по полученной зависимости оценить изменение температуры пожарных газов в выработке. Это будет способствовать разработке мероприятий по дальнейшему ведению аварийно-спасательных работ и выбору аварийного режима проветривания (нормальный или реверсивный) выемочного участка.

Список литературы / References

1. Пашковский, П.С., Лебедев, В.И. Проветривание шахт при подземных пожарах. – Донецк: Арпи, 2012. – 448 с. – ISBN 978-966-2555-05-9.
Pashkovskiy, P.S., Lebedev, V.I. *Provetrivaniye shakht pri podzemnykh pozharakh* [Ventilation of mines by underground fires]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 448 p. – ISBN 978-966-2555-05-9.
2. Тушение подземных пожаров на угольных шахтах. – М.: Недра, 1977. – 248 с.
Tusheniye podzemnykh pozharov na ugol'nykh shakhtakh [Fighting the underground fires at coal mines]. Moscow, Nedra Publ., 1977, 248 p.
3. Ликвидация аварий в угольных шахтах. Теория и практика / В.В. Радченко, С.Н. Смоланов, Г.М. Алейникова и др. – Киев: Техника, 1999. – 320 с.
Radchenko, V.V., Smolanov, S.N., Aleynikova, G.M. etc. *Likvidatsiya avariy v ugol'nykh shakhtakh. Teoriya i praktika* [Accident elimination in coal mines. Theory and practice]. Kiev, Tekhnika Publ., 1999, 320 p.

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

*Nikolay Victorovich Karnaukh, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: oavr@mail.ru;
Aleksandr Victorovich Mavrodi, engineer; e-mail: mavrodi-av@mail.ru;
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DNR;
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phones (+38 062) 311-42-79, (+38 050) 283-61-87*

CALCULATION OF TEMPERATURE OF FIRE GASES OUTSIDE THE SEAT OF FIRE

Purpose. The PC-aided calculation of the air temperature outside the seat of fire in the horizontal mine working.

Methods. Calculations according to empirical dependences of thermal parameters of the ventilation stream by the fire in the horizontal mine working.

Results. The PC-aided program of realization of calculation of the air temperature outside the seat of fire in the horizontal mine working with the pictorial presentation of the results in the form of the diagram of air temperature change along length of the mine working is proposed.

Scientific novelty. The PC-aided program of calculation of the temperature of the fire gases permits the quick determination of its changes in the same direction as the movement of the ventilation stream.

Practical value. The program worked out allows calculating the temperature of the fire gases outside the seat of fire that is the key parameter by choice of emergency ventilation conditions, local reversal and measures on life-saving the mine workers and guaranteeing the safety of the mine rescuers.

Keywords: *fire; horizontal mine working; temperature of fire gases; program of calculation; seat.*

УДК 614.841.41

Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: orlikova.69@yandex.ua;

Кристина Валериевна Глушенко, инж. I кат.; e-mail: kristina_hlushenko@mail.ru;

Виктория Викторовна Волынец, техник; e-mail: obep.niigd@list.ru;

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

РЕАКЦИОННАЯ АКТИВНОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ

Цель. Экспериментальное определение условий теплового самовозгорания ранее не изученных веществ растительного происхождения, расчет кинетических параметров окисления и исследование их реакционной способности.

Методика. Комплексный подход, включающий экспериментальные исследования органических веществ и расчетно-аналитический метод определения кинетических параметров окисления при тепловом самовозгорании.

Результаты. Установлены зависимости температуры самовозгорания от удельной поверхности образцов исследуемых веществ и времени до их самовозгорания. Рассчитаны кинетические параметры окисления органических веществ на основании полученных экспериментальных данных.

Научная новизна. Впервые определены условия теплового самовозгорания некоторых веществ растительного происхождения и показана возможность расчета константы скорости окисления при тепловом самовозгорании этих веществ.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют прогнозировать пожароопасность веществ растительного происхождения для разработки профилактических мероприятий при их хранении.

Ключевые слова: условия теплового самовозгорания; кинетические параметры окисления; скорость реакции; органические вещества.

Постановка проблемы. Длительность хранения различных органических веществ сопряжена с опасностью возникновения самовозгорания их скоплений, что, в соответствии со статистикой пожаров, приводит к значительным материальным и человеческим жертвам [1].

Многие аварии с пожарами и взрывами на объектах хранения и переработки органических веществ явились следствием развития химических (окислительных), тепловых и микробиологических процессов, приводивших к самонагреванию и самовозгоранию [2]. Этим процессам способствуют определенные физические свойства веществ (низкая теплопроводность, большая поверхность, плотность, пористость) и условия их хранения (температура окружающей среды, влажность, форма и размеры скопления, коэффициент теплоотдачи).

Для решения практических задач профилактики самовозгорания веществ разработаны методы расчета критических условий, учитывающие форму рассматриваемого скопления. В меньшей степени исследованы кинетические

параметры процесса окисления твердых дисперсных веществ, в частности, константа скорости реакции как параметр, характеризующий реакционную активность вещества в окислительных процессах. Так, в работе [3] рассмотрены кинетические параметры – константа скорости реакции окисления при критической температуре, предэкспоненциальный множитель, энергия активации, скорость тепловыделения, характеризующие процесс окисления некоторых пожароопасных органических веществ с известными температурами самовозгорания.

Цель работы – экспериментально определить условия теплового самовозгорания веществ растительного происхождения, ранее не изученных, и исследовать их реакционную способность.

Материалы и результаты исследований. Тепловое самовозгорание – физико-химический процесс, скорость которого зависит от скорости реакции окисления, поступления кислорода к реагирующей поверхности и от интенсивности теплообмена самонагревающегося вещества с внешней средой. Дисперсные вещества имеют четкую границу соприкосновения с окружающей средой, через которую воздух проникает между частицами внутрь массы вещества. Кислород, попадая в поры частиц или волокон дисперсного вещества, адсорбируется в поверхностном слое. Повышенная влажность, температура окружающей среды и другие факторы могут спровоцировать образование очага с более высокой температурой T , чем в остальной массе скопления и окружающей среде T_0 , как представлено на схеме (рис. 1). Внутри небольшого очага протекают окислительные процессы с выделением теплоты q . Температура в реакционной зоне будет постепенно расти и достигнет значений, при которых начнутся процессы термической деструкции твердого вещества с выделением продуктов разложения (ПГ), которые будут конденсироваться и адсорбироваться на поверхности вещества.

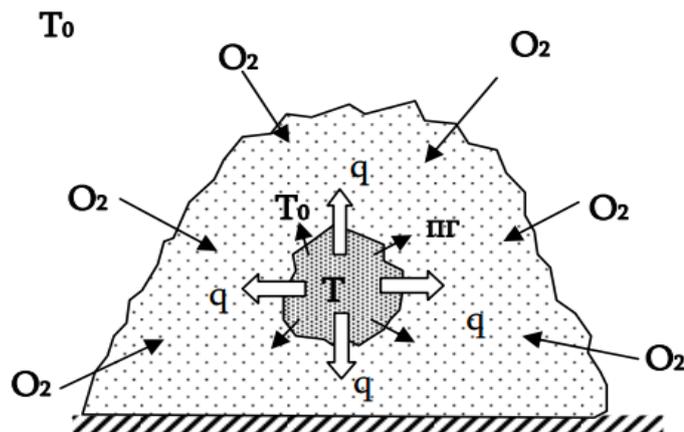


Рис. 1. Схема возникновения «горячей точки» в массе дисперсного растительного вещества

В свою очередь высокая температура интенсифицирует экзотермические реакции окисления в массе вещества, повышая общую скорость процесса. Обязательным условием такого процесса является наличие кислорода и большой поверхности горючего вещества.

При исследовании процесса теплового самовозгорания определяют кинетические параметры окисления веществ [4, 5], среди которых химическую реакцию характеризуют значения энергии активации и предэкспоненциального множителя. Представляет интерес установление константы скорости реакции окисления как параметра, характеризующего реакционную активность вещества.

Экспериментальные исследования по определению условий теплового самовозгорания твердых веществ выполняли в соответствии с требованиями работы [5].

Образцы вещества насыпали в корзинки кубической формы с размером ребра l , равным 20, 35, 50 и 75 мм. Корзинки с образцами помещали в центре воздушного термостата, температуру которого поддерживали постоянной с помощью терморегулятора. Контроль продолжительности и хода испытаний осуществляли с помощью термоэлектрических преобразователей, которые устанавливали таким образом (рис. 2), чтобы один из них соприкасался с внешней стороной корзинки, второй – контактировал с образцом и располагался в его центре, третий – находился на расстоянии (30 ± 1) мм от стенки корзинки. Для записи показаний термопар применяли потенциометр КСП-2.

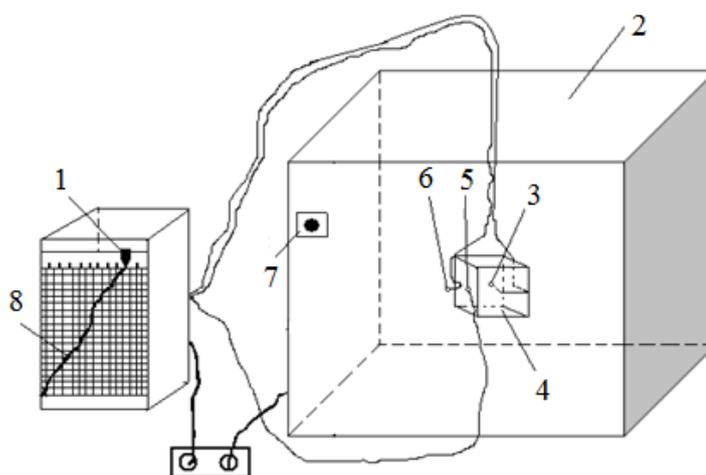


Рис. 2. Схема лабораторной установки для определения температуры самовозгорания твердых веществ:

- 1 – потенциометр КСП-2; 2 – термостат; 3, 5, 6 – рабочие спаи термоэлектрических преобразователей; 4 – корзинка с исследуемым веществом; 7 – терморегулятор; 8 – диаграммная лента

Испытания проводили при различных начальных температурах в термостате с образцами данного объема до достижения минимальной температуры, при которой происходило самовозгорание. Когда температура в

центре образца возрастала более чем на 100 °С по сравнению с выбранной начальной температурой термостата, фиксировали самовозгорание. Следующее испытание проводили при температуре меньше на 10 °С, самовозгорания не происходило. Фиксировали продолжительность испытания от момента выравнивания температур образца и в термостате до момента самовозгорания τ , ч.

Для каждого размера исследуемого вещества рассчитывали удельную поверхность S , м⁻¹, по формуле

$$S = F/V, \quad (1)$$

где F – полная наружная поверхность образца, м²;

V – объем образца, м³.

В качестве объектов исследования (табл. 1) выбраны вещества с неизвестными условиями теплового самовозгорания, а именно: хвойные опилки, луговое сено, овес неочищенный и древесные пеллеты [6].

Таблица 1

Полученные экспериментальные значения исследуемых веществ

Вещество	Размер ребра образца, м	Удельная поверхность S , м ⁻¹	Температура самовозгорания T_c , °С	Время до самовозгорания τ , ч
Хвойные опилки	0,02	211,11	240	0,5
	0,035	168,25	235	0,6
	0,05	118,43	220	0,95
	0,0765	77,76	205	2,2
Луговое сено	0,02	211,11	215	0,8
	0,035	168,25	205	0,9
	0,05	118,43	195	1,225
	0,0765	77,76	185	1,95
Неочищенный овес	0,016	236,11	255	0,6
	0,035	168,25	230	1,225
	0,05	118,43	220	1,9
	0,0765	77,76	210	3,7
Древесные пеллеты	0,02	211,11	227,5	1,025
	0,035	168,25	225	1,35
	0,05	118,43	195	3,5
	0,0765	77,76	185	5,5075

Для оценки полученных результатов устанавливали линейную зависимость температуры самовозгорания от удельной поверхности и времени до самовозгорания в логарифмических координатах по формулам (табл. 2):

$$\lg T_c = A_p + n_p \lg S ; \quad (2)$$

$$\lg T_c = A_b - n_b \lg \tau, \quad (3)$$

где T_c – температура самовозгорания, °С;

A_p, n_p, A_b, n_b – коэффициенты, определяемые по опытным данным;

τ – время до самовозгорания, ч.

Таблица 2

Определение температуры самовозгорания исследуемых веществ

Вещество	Коэффициенты уравнений (2) и (3)				Обобщенный вид уравнений (2) и (3)
	A_p	n_p	A_b	n_b	
Хвойные опилки	2,0051	0,1627	2,3459	0,1068	$\lg T_c = 2,005 + 0,163 \lg S$; $\lg T_c = 2,346 - 0,107 \lg \tau$
Луговое сено	1,9863	0,1475	2,3097	0,1582	$\lg T_c = 1,986 + 0,147 \lg S$; $\lg T_c = 2,310 - 0,158 \lg \tau$
Неочищенный овес	1,9979	0,1683	2,3773	0,1068	$\lg t_c = 1,998 + 0,168 \lg S$; $\lg t_c = 2,377 - 0,107 \lg \tau$
Древесные пеллеты	1,8294	0,2289	2,3630	0,1300	$\lg t_c = 1,829 + 0,229 \lg S$; $\lg t_c = 2,363 - 0,130 \lg \tau$

Для расчета кинетических параметров процесса термоокисления исследуемых веществ в качестве исходных данных использовали теплофизические характеристики [7], приведенные в табл. 3, и экспериментальные данные (табл. 1).

Таблица 3

Теплофизические параметры исследуемых веществ растительного происхождения

Вещество	Плотность ρ , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/(м·К)	Удельная теплоёмкость c , Дж/(кг·К)	Теплота реакции окисления Q , Дж/кг
Хвойные опилки	190	0,054	1200	82237
Луговое сено	200	0,15	1300	78125
Неочищенный овес	1270	0,245	1584	12303
Древесные пеллеты	400	0,13	2720	39062,5

В качестве примера рассмотрим хвойные опилки с размером образца $l = 35$ мм. Данные для других размеров получим, используя приведенную ниже последовательность расчета.

1. Рассчитаем число Рэлея, принимая энергию активации $E = 100$ кДж/моль, по формуле

$$Ra = \frac{g}{\nu a} l^3 \frac{RT_c}{E}, \quad (4)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

ν – кинематическая вязкость воздуха при температуре $T_0 = 293$ К, равная $1,51 \cdot 10^{-5}$ м/с²;

a – коэффициент температуропроводности воздуха при температуре $T_0 = 293$ К, равный $2,14 \cdot 10^{-5}$ м/с²;

l – высота образца (минимальный характерный размер), м;

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

E – энергия активации реакции окисления, принимают равной 100 кДж/моль;

T_c – температура самовозгорания образца, К.

Коэффициент Рэлея для исследуемой корзинки с веществом равен $Ra = 55120$.

2. Коэффициент теплоотдачи α , Вт/(м²·К), найдем по уравнению

$$\alpha = \frac{\lambda_b}{l} (2 + 0,6\sqrt{Ra}), \quad (5)$$

где λ_b – коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м·К), который определяют по формуле

$$\lambda_b = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5} T_c. \quad (6)$$

Теплопроводность воздуха при $T_c = 508$ К равна 0,039 Вт/(м·К), а коэффициент теплоотдачи хвойных опилок 12,646 Вт/(м²·К).

3. По значению коэффициентов теплоотдачи и теплопроводности вещества и половине высоты $r = l/2$ вычислим критерий Bi :

$$Bi = \frac{\alpha r}{\lambda}, \quad (7)$$

который для образца хвойных опилок равен 4,098.

4. Функцию $\varphi_1(Bi)$, учитывающую интенсивность теплообмена образца с воздухом, для полученного значения Bi находим по формуле

$$\varphi_1(Bi) = \frac{Bi}{2} (\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi) \exp \frac{\sqrt{Bi^2 + 4} - Bi - 2}{Bi}. \quad (8)$$

Функция $\varphi_1(Bi)$ равна 0,650.

5. Параметры β и γ рассчитываем по формулам

$$\beta = \frac{RT_c}{E}; \quad (9)$$

$$\gamma = \frac{cRT_c^2}{QE}, \quad (10)$$

и получаем значения $\beta = 0,0422$ и $\gamma = 0,313$.

6. Критическое значение параметра Франк-Каменецкого определим по формуле

$$\delta_{кр} = \delta_0 \varphi_1(Bi)(1 + \beta)(1 + 2,4\gamma^{2/3}), \quad (11)$$

где δ_0 – критическое значение параметра Франк-Каменецкого при интенсивном теплообмене, равное 2,52 для образцов кубической формы.

Для исследуемого образца хвойных опилок $\delta_{кр} = 3,418$ (табл. 4).

Таблица 4

Расчетные данные для образцов хвойных опилок кубической формы

$l, \text{ м}$	$T_c, \text{ К}$	Ra	$\alpha, \text{ Вт/(м}^2 \text{ К)}$	Bi	$\varphi_1(Bi)$	β	γ	$\delta_{кр}$
0,02	513	10386	16,059	2,974	0,568	0,0427	0,319	1,996
0,035	508	55120	12,646	4,098	0,650	0,0422	0,313	3,418
0,05	493	155954	10,744	4,974	0,696	0,0410	0,295	3,613
0,0765	478	541567	8,988	6,366	0,748	0,0397	0,277	3,829

7. Для каждого размера образца рассчитаем безразмерную величину M :

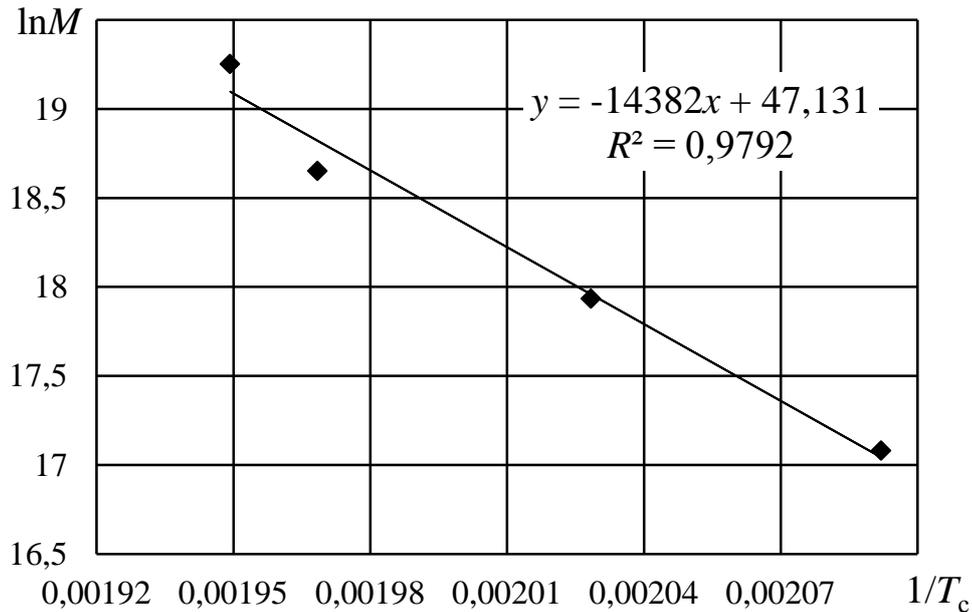
$$M = \frac{\delta_{кр} RT_c^2}{r^2 \rho} = 1,260 \cdot 10^8.$$

8. С использованием значений M , $\delta_{кр}$, T_c , r , ρ (рис. 3) определим численные значения параметра N , энергии активации E и предэкспоненциального множителя реакции окисления k_0 из следующего уравнения:

$$\ln M = \ln N - \frac{E}{R T_c}, \quad (11)$$

где параметр N находим как

$$N = EQk_0/\lambda. \quad (12)$$

Рис. 3. Зависимость $\ln M$ от обратной температуры $1/T_c$

Таким образом: $E = 119600$ Дж/моль; $N = 2,943^{20}$ Дж·м·К/(моль·кг); $k_0 = 1,66 \cdot 10^9$ с⁻¹.

9. Константу скорости реакции окисления хвойных опилок при критической T_c для каждого размера корзиночки рассчитаем по уравнению Аррениуса:

$$k_{T_c} = k_0 e^{-\frac{E}{RT_c}}. \quad (13)$$

Аналогичным образом рассчитаем для других исследуемых веществ значения энергии активации, предэкспоненциального множителя и константы скорости реакции окисления (табл. 5).

Таблица 5

Параметры кинетики процесса окисления веществ

Вещество	l , м	T_c , К	E , Дж/моль	Qk_0/λ , м·К/кг	k_0 , с ⁻¹	k_{T_c} , с ⁻¹
Хвойные опилки	0,02	513	119600	$2,461 \cdot 10^{15}$	$1,616 \cdot 10^9$	$1,079 \cdot 10^{-3}$
	0,035	508				$8,187 \cdot 10^{-4}$
	0,05	493				$3,459 \cdot 10^{-4}$
	0,0765	478				$1,385 \cdot 10^{-4}$
Луговое сено	0,02	488	118774	$4,629 \cdot 10^{15}$	$8,887 \cdot 10^9$	$1,718 \cdot 10^{-3}$
	0,035	478				$9,311 \cdot 10^{-4}$
	0,05	468				$4,916 \cdot 10^{-4}$
	0,0765	458				$2,524 \cdot 10^{-4}$

Окончание табл. 5

Вещество	l , м	T_c , К	E , Дж/моль	Qk_0/λ , м·К/кг	k_0 , с ⁻¹	k_{T_c} , с ⁻¹
Неочищенный овес	0,016	528	103410	$9,021 \cdot 10^{12}$	$1,796 \cdot 10^8$	$1,056 \cdot 10^{-2}$
	0,035	503				$3,276 \cdot 10^{-3}$
	0,05	493				$1,984 \cdot 10^{-3}$
	0,0765	483				$1,17710^{-3}$
Древесные пеллеты	0,02	501	78818	$2,085 \cdot 10^{11}$	$6,938 \cdot 10^5$	$4,122 \cdot 10^{-3}$
	0,035	498				$3,748 \cdot 10^{-3}$
	0,05	468				$1,106 \cdot 10^{-3}$
	0,0765	458				$7,108 \cdot 10^{-4}$

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что образцы лугового сена имеют наименьшую температуру самовозгорания, поэтому в местах их скопления необходим мониторинг окружающей среды. Самовозгорание неочищенного овса наблюдают при более высокой температуре, чем у остальных образцов, но высокие значения константы скорости окисления свидетельствуют о повышенной реакционной активности. Наибольшее значение энергии активации рассчитано для образцов хвойных опилок, имеющих небольшие значения k_{T_c} , что свидетельствует о более низкой реакционной активности, чем у других веществ.

Выводы. Таким образом, методом контактного теплового нагревания определены условия теплового самовозгорания не исследованных ранее дисперсных веществ растительного происхождения. Предложен способ расчета кинетических параметров окисления веществ, в частности, константы скорости реакции окисления при критической температуре. Определены значения констант скоростей окисления для хвойных опилок, лугового сена, неочищенного овса и древесных пеллет. Полученные результаты могут быть использованы для прогнозирования пожарной опасности органических веществ при хранении.

Список литературы / References

1. Климкин, В.И. Пожары и пожарная безопасность в 2011 году: статистический сб. – М.: ВНИИПО, 2012. – 137 с.

Klimkin, V.I. *Pozhary i pozharnaya bezopasnost' v 2011 godu: statisticheskiy sb.* [Fires and fire safety in the year 2011: statistical collection]. Moscow, VNIPO Publ., 2012, 137 p.

2. Таубкин, С.И. Пожар и взрыв, особенности их экспертизы. – М.: ВНИИПО, 1999. – 600 с.

Taubkin, S.I. *Pozhar i vzryv, osobennosti ikh ekspertizy* [Fire and explosion, peculiarities of their examination]. Moscow, VNIPO Publ., 1999, 600 p.

3. Греков, С.П., Пашковский, П.С., Орликова, В.П. Реакционная активность органических материалов и их пожароопасность // Научовий вісник УкрНДІПБ. – 2015. – № 2, вып. 32. – С. 26 – 31.

Grekov, S.P., Pashkovskiy, P.S., Orlikova, V.P. *Reaktsionnaya aktivnost' organicheskikh materialov i ikh pozharoopasnost'* [Reaction activity of organic materials and their fire hazard]. *Naukovyi visnyk UkrNDIPB* [Scientific bulletin of the UkrNDIPB]. 2015, issue 32, no. 2, pp. 26 – 31.

4. Изучение возможности самовозгорания торфяного мха при транспортировании и хранении / Д.Н. Соколов, И.А. Корольченко, В.И. Горшков, А.В. Казаков, И.В. Кузнецов // Пожарная безопасность. – 2010. – № 3. – С. 113 – 119.

Sokolov, D.N., Korol'chenko, I.A., Gorshkov, V.I., Kazakov, A.V., Kuznetsov I.V. *Izucheniye vozmozhnosti samovozgoraniya torfyanogo mkha pri transportirovani i khraneni* [Examination of possibility of spontaneous combustion of the peat-moss by transport and storage]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2010, no. 3, pp. 113 – 119.

5. Корольченко, И.А. Тепловое самовозгорание насыпей и отложений твердых дисперсных материалов: дис. ... д-ра техн. наук. – М.: ВНИИПО, 2007. – 472 с.

Korol'chenko, I.A. *Teplovoye samovozgoraniye nasypey i otlozheniy tvyerdykh dispersnykh materialov*. Diss. cand. tekhn. nauk [Heat spontaneous combustion of mounds and accumulations of the solid disperse materials. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, VNIPO Publ., 2007, 472 p.

6. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов: справ. изд.: в 2 кн. / А.Н. Баратов, А.Я. Корольченко, Г.Н. Кравчук, и др. – М.: Химия, 1990. – Кн. 1. – 496 с. Кн. 2. – 384 с.

Baratov, A.N., Korol'chenko, A.Ya., Kravchuk, G.N. etc. *Pozharovzryvoopasnost' veshchestv i materialov: sprav. izd.: v 2 kn.* [Fire and explosion hazard of substances and materials: reference book: in 2 books]. Moscow, Khimiya Publ., 1990. Book 1 – 496 p. Book 2 – 384 p.

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

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

Victoria Petrovna Orlikova, scientific associate; e-mail: orlikova.69@yandex.ua;

Christina Valerievna Hlushenko, engineer of first category; e-mail: kristina_hlushenko@mail.ru;

Victoria Victorovna Volynets, technician; e-mail: obep.niigd@list.ru;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-13-52

REACTIONARY ACTIVITY OF ORGANIC SUBSTANCES

Purpose. Experimental determination of conditions of the heat spontaneous combustion of the substances of phytogenous origin that were not studied earlier, calculation of kinetic oxidation parameters and examination of their reactivity.

Methods. The complex approach including the experimental investigations of the organic substances and the estimation and calculation method of determination of the kinetic oxidation parameters by the thermal spontaneous combustion.

Results. The dependences of the temperature of spontaneous combustion on the specific surface of the samples of substances being investigated and the time till their spontaneous combustion were ascertained. The kinetic oxidation parameters of the organic substances were calculated on the basis of the experimental data received.

Scientific novelty. The conditions of the thermal spontaneous combustion of some substances of phytogenous origin were determined, and the possibility of calculation of the oxidation rate constant by the heat spontaneous combustion of these substances was shown for the first time.

Practical value. The results received allow forecasting the fire hazard of the substances of phytogenous origin to work out the safety measures by their storage.

Keywords: *conditions of the heat spontaneous combustion; kinetic oxidation parameters; reaction rate; organic substances.*

УДК 622.822.22:614.844.5

Дмитрий Иванович Момот, науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@list.ru;

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-73-56

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ
ГАЗОМЕХАНИЧЕСКОЙ ПЕНЫ НА СЕТКАХ**

Цель. Генерирование газомеханической пены на сетках пеногенераторов с принудительной подачей воздуха (инертного газа).

Методика. Экспериментальные исследования.

Результаты. Найден новый принцип генерирования газомеханической пены.

Новизна. Генерирование газомеханической пены при подаче на сетку раствора пенообразователя и газа как с одной, так и с противоположных сторон.

Практическая значимость. Изменение кратности генерируемой пены, исключение засорения пеногенерирующей сетки.

Ключевые слова: кратность пены; газомеханическая пена; раствор пенообразователя; кольцевая форсунка; пеногенерирующая сетка.

Постановка проблемы. Получение газомеханической пены в сеточных пеногенераторных установках и устройствах – сложный процесс. Необходимо, чтобы на выходе из устройства был непрерывный пенный поток, обязательное условие – его устойчивость без срыва процесса пеногенерации, что важно в условиях аварийной ситуации в шахте. Процесс образования газомеханической пены в сеточных пеногенераторных установках возможен в случае, если будут выполнены следующие условия.

Первое условие: радиус капли пенообразующего раствора, поступающего на ячейку сетки, должен превышать размер ячейки в полтора раза и более, что является критерием стационарности процесса пенообразования.

Второе условие: неразрывность образованного после пеногенерирующей сетки пенного потока, которая обусловлена снизу и сверху минимальной и максимальной скоростью потока газа, поскольку динамический напор этого потока должен успевать формировать пузырек пены и не должен за время формирования преждевременно сдувать его с сетки.

Для работы всех сеточных пеногенераторных установок в режиме устойчивого пенообразования на сетках необходимо соблюдение данных условий. Нарушение хотя бы одного из них ведет к срыву данного режима либо вообще процесс вспенивания на сетках становится невозможным.

Цель исследования. Разработать экспериментальную установку для изучения процесса получения пены в трубопроводах.

Результаты исследований. Первая серия экспериментов проведена по классической схеме получения газомеханической пены, когда на сетку поступает газ и раствор пенообразователя с одной стороны (рис. 1,а). Пеногенерирующая сетка расположена перпендикулярно к направлению движения раствора пенообразователя и газа. При такой схеме действуют все вышеприведенные ограничения при получении пен, которые отразились на параметрах классического трубного сеточного пеногенератора (максимальная производительность по пене $5 \text{ м}^3/\text{мин}$ при максимальном давлении $0,5 \text{ МПа}$) [1]. В данном случае потери раствора пенообразователя возникают в связи с тем, что капли раствора диаметром меньше размера стороны пеногенерирующей сетки не участвуют в процессе пенообразования.

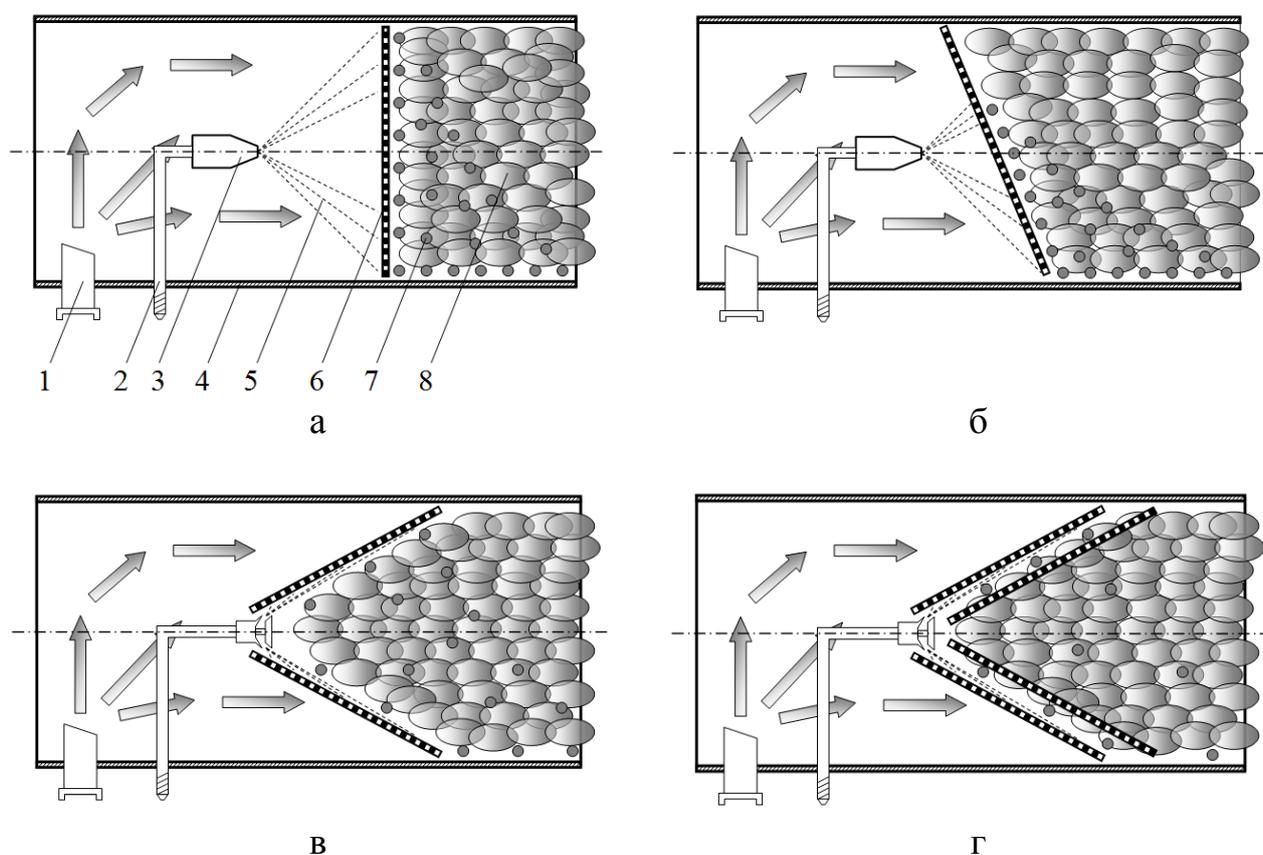


Рис. 1. Схема экспериментального стенда пеногенераторного устройства:
 1 – патрубок для подвода воздуха (инертного газа); 2 – патрубок для подвода раствора пенообразователя; 3 – форсунка; 4 – корпус; 5 – раствор пенообразователя;
 6 – пеногенерирующая сетка; 7 – раствор пенообразователя, не участвующий в процессе пеногенерации; 8 – воздушно-механическая (инертная) пена;
 а, б – подача газа и раствора пенообразователя на сетку с одной стороны;
 в, г – подача газа и раствора пенообразователя на сетку с противоположных сторон

Недостатки схемы получения газомеханической пены, представленной на рис. 1,а:

- потери раствора пенообразователя. Капли набрызгиваемого на сетку раствора пенообразователя, диаметр которых меньше размера стороны ячейки пеногенерирующей сетки, не участвуют в процессе пенообразования и уходят вместе с пенным потоком;

- засорение ячеек пеногенерирующей сетки из-за использования шахтной неочищенной воды, содержащей механические примеси, для приготовления раствора пенообразователя и как следствие прекращение процесса пеногенерации. Применение стабилизирующих добавок, в частности бентонитовой глины, также приводит к засорению пеногенерирующей сетки и невозможности получения пены, так как направление потока газа и раствора пенообразователя совпадает. Кроме того, применение воды для получения раствора пенообразователя, содержащей примеси, неприемлемо по той же причине.

Для получения газомеханической пены применяли пеногенерирующие сетки с размерами ячеек 0,5×0,5 мм; 0,7×0,7 мм; 1×1 мм. Оптимальный размер ячеек сетки принят 0,7×0,7 мм.

Вторую серию экспериментов проводили также по классической схеме, но с наклоном пеногенерирующей сетки к поверхности корпуса пеногенераторной установки (рис. 1,б). Наклон сетки к направлению потока раствора пенообразователя определяли расчётным путём, что подтверждено экспериментально. Серию экспериментов проводили на стенде для наклона сетки под углом 45, 30, 25, 20 и 15°. Оптимальный угол наклона сетки к потоку 20°. В этих условиях для движущейся капли раствора пенообразователя ячейка сетки является, в вертикальной проекции, квадратом, размер которого стремится к нулю, а поверхность сетки в проекции к движущейся капле есть гладкая поверхность. В этом случае сетка для любого размера капель является гладкой поверхностью, по которой капля растекается и образует плёнку на ячейке. Потери раствора пенообразователя в данном случае сведены к минимуму.

Кроме того, в данной серии также проводились экспериментальные исследования с добавлением в раствор пенообразователя стабилизирующих добавок (бентонитовой глины) и других механических примесей.

Недостаток схемы получения газомеханической пены, представленной на рис. 1,б: засорение пеногенерирующей сетки, как и при классической схеме, хотя и в меньшей степени. Это связано с тем, что часть механических примесей, содержащихся в растворе пенообразователя, удаляется с сетки за счёт её наклона к направлению потока газа и раствора пенообразователя.

В первой и во второй сериях экспериментов для набрызгивания раствора пенообразователя на сетку применяли серийно выпускаемые форсунки зонтичного и конусного типов. Применение в растворе пенообразователя

стабилизирующих добавок и механических примесей приводит к их засорению наряду с пеногенерирующей сеткой.

Для исключения засорения форсунки и пеногенерирующей сетки в НИИГД «Респиратор» разработана принципиально новая схема получения газомеханической пены и сконструирован экспериментальный стенд регулируемой самоочищающейся высоконапорной пеногенераторной установки (ПВТ) для получения и подачи пены по трубопроводам при профилактике и тушении пожаров, принципиально отличающейся от существующих установок (рис. 2).

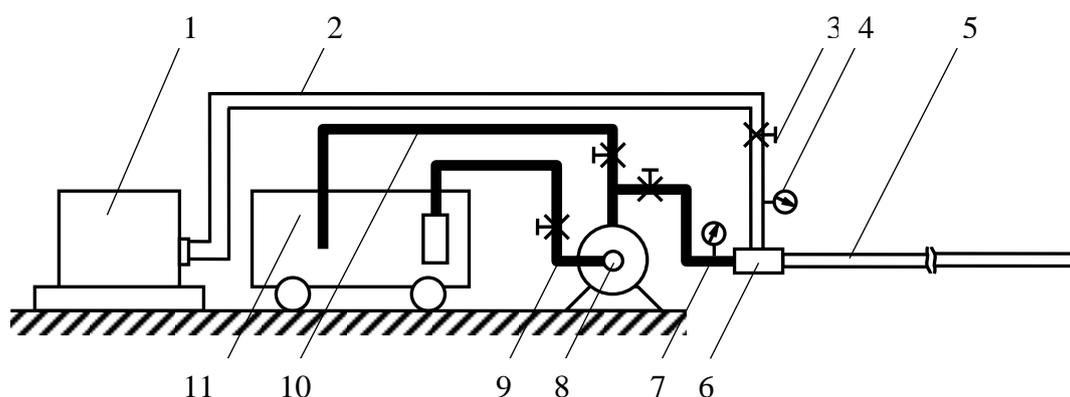


Рис. 2. Схема расположения оборудования для получения газомеханической пены:

- 1 – компрессор; 2 – трубопровод для подачи сжатого воздуха; 3 – запорная арматура; 4 – манометр; 5 – трубопровод для подачи газомеханической пены; 6 – установка ПВТ; 7 – трубопровод для подачи раствора пенообразователя; 8 – насос; 9 – всасывающий трубопровод; 10 – обратный трубопровод; 11 – ёмкость с раствором пенообразователя

Сжатый воздух по трубопроводу 2 подаётся к пеногенератору с помощью компрессора. Из ёмкости 11 объёмом 1 м^3 раствор пенообразователя при помощи насоса через трубопровод 9 подаётся по трубопроводу 7 к устройству ПВТ. Давление воздуха и раствора пенообразователя контролируют манометры. Изменение расхода воздуха и раствора пенообразователя осуществляется при помощи запорной арматуры. Давление воздуха, поступающего на установку, постоянно. Поэтому изменение кратности пены регулировалось изменением объёма поступающего в установку раствора пенообразователя. Излишки раствора пенообразователя через трубопровод 10 сбрасывались в ёмкость с раствором пенообразователя. Полученная газомеханическая пена транспортировалась по трубопроводу 5 к месту очага горения. Длина экспериментального трубопровода 200 м.

Предложенная разработчиками схема получения пены (рис. 1,в) предусматривает подачу раствора пенообразователя и газа с разных сторон пеногенерирующей сетки [2], расположенной под углом к направлению движения раствора пенообразователя и газа.

По этой схеме проводили исследования получения газомеханической пены с использованием шахтной неочищенной воды, содержащей механические примеси, с добавлением бентонитовой глины. Попадающий на поверхность пеногенирующей сетки мусор сдувается потоком, идущим с противоположной стороны сетки, а её наклон к корпусу пеногенератора исключает первое условие (см. ранее). За счёт наклона пеногенирующей сетки увеличилась её поверхность, что позволило рационально использовать раствор пенообразователя. Для исключения засорения форсунки разработана принципиально новая её конструкция – кольцевого типа. Изменение размера кольцевой щели позволяет регулировать расход раствора пенообразователя непосредственно на установке. Кольцевая форсунка зарекомендовала себя надёжной в применении, при использовании стабилизирующих добавок не наблюдалось случаев её засорения.

Сначала испытания устройства ПВТ проводили с использованием одной пеногенирующей сетки в виде конуса со срезанной вершиной (см. рис. 1,в). Благодаря направленному разбрызгиванию раствора пенообразователя через кольцевую форсунку используется вся площадь конусной пеногенирующей сетки, в связи с чем потери раствора сведены к минимуму. Серией экспериментов подтвержден оптимальный угол наклона пеногенирующей сетки к продольной оси корпуса пеногенератора: 20° . Увеличение поверхности пеногенирующей сетки за счёт её наклонного расположения и применение кольцевой форсунки позволили расширить параметры получения пен (максимальная производительность по пене $15 \text{ м}^3/\text{мин}$ при максимальном давлении воздуха $1,5 \text{ МПа}$). Максимальная дальность подачи пены по трубопроводам 2 км [3].

Во время проведения испытаний задавалась кратность получаемой пены в пределах $5 \dots 150$, максимальная дальность подачи пены в шахтных условиях 2000 м . При подаче расчётного количества газа и раствора пенообразователя кратность получаемой газомеханической пены выше, чем расчётная. Как показали проведенные исследования, это связано с тем, что часть раствора пенообразователя не участвовала в процессе пеногенерации и уходила вместе с потоком пены (рис. 3). Для исключения потерь пенообразователя применён пакет из двух пеногенирующих сеток (рис. 1,г).

Данный пакет сеток конструктивно выполнен таким образом, что расположение внутренней сетки позволило свести к минимуму потери раствора пенообразователя. Механические примеси, содержащиеся в растворе пенообразователя, сдуваются с пеногенирующих сеток напором газа в поток пены, соответственно не происходит срыва процесса пеногенерации и, что немаловажно, не приводит к изменению выбранной кратности газомеханической пены. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что при работе устройства ПВТ не наблюдается отклонений; заранее выбранная кратность пены соответствует генерируемой;

не происходит срыва процесса пеногенерации; кратность пены можно изменять в процессе работы установки [4].

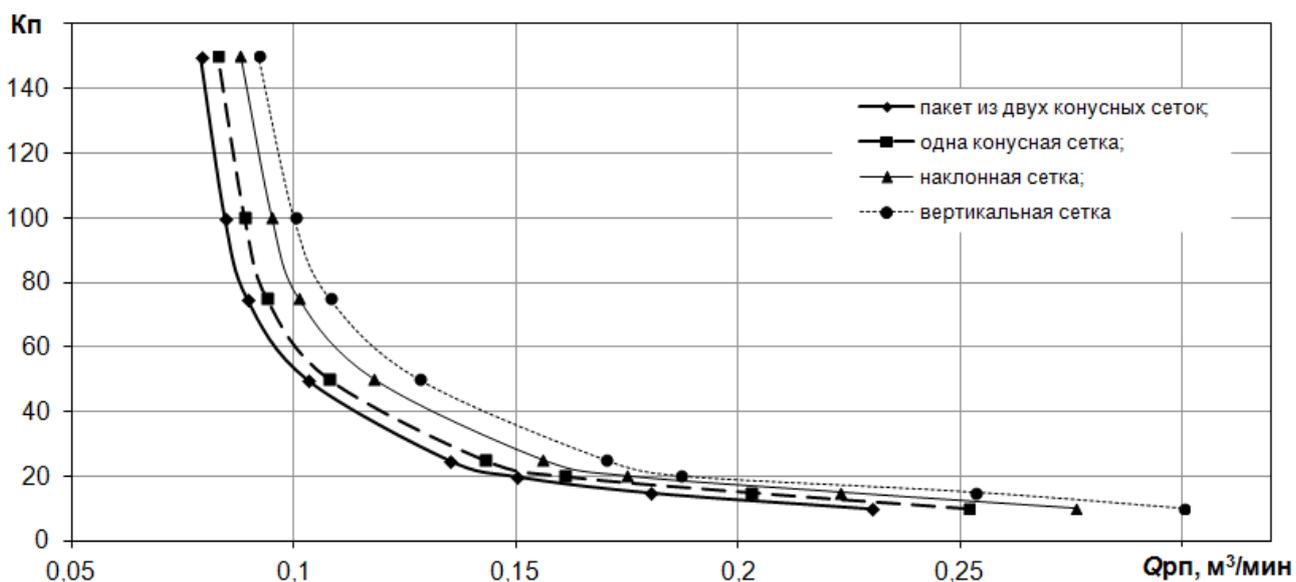


Рис. 3. Зависимость кратности газомеханической пены от расхода раствора пенообразователя

Из приведенных графиков видно, что количество раствора пенообразователя для определенной кратности пены, совпадающее с расчетными данными, обеспечивает применение пакета из двух конусных сеток; при этом наблюдается значительная экономия раствора пенообразователя.

После проведения экспериментальных исследований разработаны пеногенераторы высоконапорные трубные ПВТ-3, ПВТ-4 и ПВТ-6 для включения в сеть шахтных трубопроводов 3", 4" и 6" соответственно.

Установка ПВТ прошла предварительные и приёмочные испытания на опытно-экспериментальном полигоне НИИГД «Респиратор» и применялась при профилактике и тушении эндогенных пожаров на шахтах им. 9-й пятилетки, им. В.М. Бажанова и им. А.Ф. Засядько [5].

Выводы. В соответствии с поставленными задачами:

- исследован процесс генерирования газомеханической пены на сетках с принудительной подачей воздуха или газообразного азота, исключены условия срыва процесса пеногенерации;
- доказана возможность использования неочищенной воды для получения газомеханической пены на разработанных регулируемых высоконапорных самоочищающихся пеногенераторах и подачи этой пены по трубопроводам или скважинам на большое расстояние к очагу пожара;
- регулирование кратности пены непосредственно на устройстве ПВТ позволяет получать газомеханическую пену кратностью 5–150, т. е. впервые в

отечественной горноспасательной практике разработан пеногенератор, способный генерировать пену низкой и средней кратности и, при необходимости, изменять ее непосредственно в процессе работы устройства;

- особенностями устройства ПВТ являются простота в изготовлении, удобство в эксплуатации и обслуживании, узлы пеногенераторов изготовлены из некорродирующих материалов;

- созданные образцы пеногенераторных устройств могут быть использованы не только для тушения подземных пожаров, но и для тушения пожаров в жилых и технических зданиях.

Благодаря новым теоретическим и экспериментальным исследованиям разработана принципиально новая схема регулируемого самоочищающегося высоконапорного пеногенераторного устройства для получения и подачи газомеханической пены по трубопроводам в труднодоступные места при профилактике и тушении пожаров [6].

Список литературы / References

1. Пеногенераторная высоконапорная установка / В.П. Засевский, С.Я. Мерайс, Л.Д. Вишневский, В.И. Нетреба // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 1992. – С. 112 – 115.

Zasevskiy, V.P., Merays, S.Ya., Vishnevskiy, L.D., Netreba, V.I. *Penogeneratornaya vysokonapornaya ustanovka* [The foam-generating high-pressure installation]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 1992, pp. 112 – 115.

2. Момот, Д.И. Обоснование конструктивных параметров пеногенератора высоконапорного трубного // Пожежна безпека: зб. наук. праць / ЛПБ. – Львів, 2005. – № 7. – С. 78 – 84.

Momot, D.I. *Obosnovaniye konstruktivnykh parametrov penogeneratora vysokonapornogo trubnogo* [Substantiation of design parameters of the pipe high-pressure foam generator]. *Pozhezhna bezpeka, zb. nauk. prats' / LIPB* [Fire safety, proc. of the LIPB]. Lviv, 2005, no. 7, pp. 78 – 84.

3. 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. *Penogenerator vysokonapornyy trubnyy* [The pipe high-pressure foam generator]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2003, pp. 11 – 15.

4. Момот, Д.И. Режим работы пеногенератора в зависимости от аэродинамических свойств трубопроводной части и конструкции сетки // Пожежна безпека та аварійно-рятувальна справа: стан, проблеми і перспективи (Пожежна безпека – 2005): матеріали VII Всеукраїнської наук.-практ. конф. – Київ: УкрНДІПБ МНС України, 2005. – С. 233 – 236.

Momot, D.I. *Rezhim roboty penogeneratora v zavisimosti ot aerodinamicheskikh svoystv truboprovodnoy chasti i konstruktsii setki* [Mode of operation of the foam generator depending on aerodynamic properties of the pipe part and design of the net]. *Pozhezhna bezpeka ta avariino-riatival'na sprava: stan, problemy i perspektivy (Pozhezhna bezpeka – 2005): materialy 7 Vseukrains'koi nauk.-prakt. konf.* [Fire safety and search-and-rescue work: state, problems and prospects (Fire safety – 2005): materials of the 7th All-Ukrainian scientific-practical conference]. Kyiv, UkrNDIPB MNS Ukrainy, 2005, pp. 233 – 236.

5. Пашковский, П.С., Греков, С.П., Зинченко, И.Н. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля: сб. науч. тр. – Донецк: Арпи, 2012. – 656 с. – ISBN 978-966-2555-04.2.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Aktual'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya: sb. nauch. tr.* [Actual problems of fighting the spontaneous combustion of coal: proc.]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p – ISBN 978-966-2555-04.2.

6. Пат. 61615 Україна, МПК⁷ А62 С 5/02, Е21 F 5/02. Пристрій для одержання газомеханічної піни / Е.А. Попов, П.С. Пашковський, Д.І. Момот; заявл. і патентовл. НДІГС «Респіратор». – № 2003032316; заявл. 18.03.2003; опубл. 15.09.2005. Бюл. № 9 від 15.09.2005.

Popov, E.A., Pashkovskiy, P.S., Momot, D.I. *Prystrii dlia oderzhannia gazomekhanichnoi piny* [Device for generation of the gas mechanical foam]. Patent UA, no. 2003032316, 2005.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук П.С. Пашковским.
Дата поступления рукописи 20.04.2016

Dmitriy Ivanovich Momot, scientific associate, e-mail: obep.niigd@list.ru;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-73-56

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF GENERATION OF THE GAS MECHANICAL FOAM ON NETS

Purpose. Generation of the gas mechanical foam on the nets of the supplied air (inert gas) foam generators.

Methods. Experimental investigations.

Results. The new principle of generation of the gas mechanical foam was found.

Novelty. Generation of the gas mechanical foam by feed of the foaming agent solution and gas on the net both from one side and from the opposite sides.

Practical value. Change of the expansion ratio of the foam generated, exclusion of obstruction of the foam generating net.

Keywords: *expansion ratio of foam; gas mechanical foam; foaming agent solution; annular spray burner; foam generating net.*

УДК 628.8:621.43.068:[725.381:643.8]

Максим Николаевич Бубела, инж.; e-mail: bubela.m@mail.ru;

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР; 283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-41-16

УДАЛЕНИЕ ВЫХЛОПНЫХ ГАЗОВ ИЗ ПОДЗЕМНЫХ АВТОСТОЯНОК

Цель. Показать возможность использования системы дымоудаления при очистке подземных автостоянок от вредных продуктов сгорания топлива.

Методика. Аналитическое обобщение информации по проблеме повышения уровня безопасности в паркингах.

Результаты. Предложено использовать систему дымоудаления в качестве аварийной системы для очистки от выхлопных газов.

Новизна. Использование системы дымоудаления в комплексе с приточно-вытяжной системой вентиляции в паркингах, а также возможность использования системы дымоудаления как аварийной системы вентиляции.

Практическая значимость. Использование системы дымоудаления для снижения концентрации выхлопных газов, что позволит сократить время воздействия токсичных веществ на организм человека, сократит до минимума риск отравления выхлопными газами, повысит уровень безопасности, а при использовании в качестве аварийной системы позволит повысить уровень ее надежности.

Ключевые слова: *паркинг; выхлопные газы; система дымоудаления; вентиляция; безопасность; автотранспорт; двигатели.*

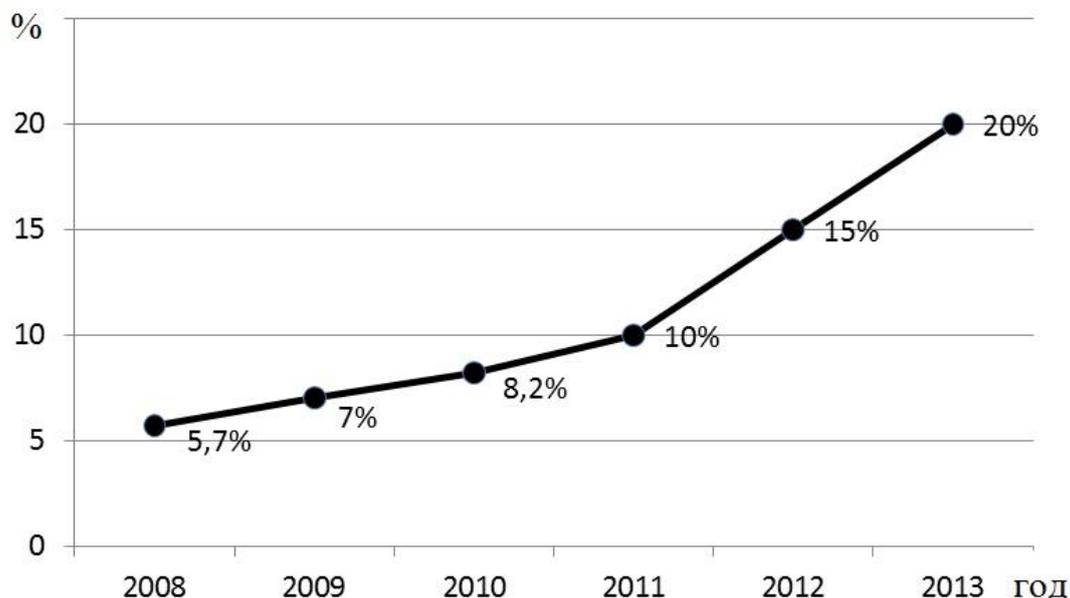
Постановка проблемы. В последнее десятилетие в ряде технически развитых стран наблюдается стремительное увеличение объемов строительства многоэтажных зданий. Это объясняется ростом населения городов, стремлением более эффективно использовать дорогостоящие земельные участки и сохранить природные защитные зоны вокруг городов. Все чаще наблюдается устройство подземных паркингов и автостоянок в таких зданиях.

Паркинги и подземные автостоянки – это часть жилых, торговых и офисных зданий, где существует большая опасность задымления. Поэтому в них предусмотрено наличие противодымной защиты, в которую входит система дымоудаления. Также такие помещения характеризуются опасностью загазованности выхлопными газами от работающих двигателей машин.

Зачастую под термином «выхлопные газы» понимают оксид углерода. В соответствии с действующими строительными нормами в автостоянках закрытого типа следует предусматривать установку приборов для измерения концентрации СО и соответствующих сигнальных приборов по контролю СО там, где круглосуточно дежурит персонал. В автостоянках закрытого типа следует предусматривать приточно-вытяжную вентиляцию по расчету ассимиляции.

В настоящее время широко применяют дизельные двигатели на легковых и грузовых машинах. И нередко в подземных парковках можно увидеть машины

именно с такими двигателями. Это не удивительно, так как топливо для таких машин стоит дешевле. Количество автомобилей с дизельным двигателем неуклонно растёт. Так, по данным [1], доля продажи автомобилей именно с этим типом двигателя за 6 лет выросла до 20 %.



Доля продажи дизельных автомобилей:

—●— процентное отношение дизельных автомобилей к общему количеству проданных

В Западной Европе этот показатель в 2011 г. составил 55,7 %, а лидером в Европе является Франция, у которой 72 % проданных машин были оснащены дизельным двигателем.

Количественный состав выхлопных газов от машин с разным типом двигателя существенно отличается (см. таблицу).

Состав выхлопных газов

Компоненты выхлопных газов	Объемная доля, %		Примечание
	Двигатели		
	бензиновые	дизельные	
Азот	74,0...77,0	76,0...78,0	Нетоксичен
Кислород	0,3...8,0	2,0...18,0	«
Пары воды	3,0...5,5	0,5...4,0	«
Диоксид углерода	5,0...12,0	1,0...10,0	«
Оксид углерода	0,1...10,0	0,01...5,0	Токсичен
Оксиды азота	0,0...0,8	0,0002...0,5	«

Как видно из таблицы, дизельный тип двигателя выделяет меньше токсичных веществ, но не стоит забывать, что наряду с возрастающей тенденцией использования автомобилей с дизельным типом двигателя

подавляющее большинство автомобилистов предпочитают использовать автомобили с бензиновым двигателем.

В составе выхлопных газов представленных выше типов двигателей, помимо привычного оксида углерода, присутствует токсичный компонент, который представляет опасность для здоровья, а именно оксиды азота, так как они примерно в 10 раз более вредны для организма, чем оксид углерода [2]. Поэтому в автостоянках закрытого типа, обслуживающих автомобили, необходимо следить дополнительно и за концентрацией оксидов азота. Рассмотрим, чем именно опасны компоненты выхлопных газов.

Диоксид углерода (CO_2) считается не токсичным, но его повышенная концентрация в воздухе оказывает негативное влияние на организм человека. Повышенная объемная доля CO_2 от 2 до 4 % в помещении вызывает у человека эффект сонливости и слабости. При достижении 7...10 % возникает удушье. Человек может ощущать головную боль, расстройство слуха, головокружение и при длительном воздействии – терять сознание. Такой уровень концентрации считается опасным для человека. Вдыхание воздуха с высокой объемной долей диоксида углерода приводит к смерти от удушья.

Оксид углерода (CO) относится к токсичным веществам. Он бесцветный и не имеет запаха и вкуса. Оксид углерода имеет высокую поражающую способность. Он сопровождает человека повсеместно, так как является продуктом горения, а кроме того, способен образовываться в организме человека. Поэтому организм человека не воспринимает оксид углерода как яд и не активизирует защитные силы, как следствие не вызывает так называемую реакцию избегания. Ситуация усугубляется еще и тем, что даже при объемной доле оксида углерода в воздухе от 0,02 % он уже начинает пагубно влиять, отравляя организм. При объемной доле CO всего лишь 0,1 % происходит активное пагубное воздействие на организм, заключающееся в том, что оксид углерода связывает гемоглобин в эритроцитах, чем создает препятствие для переноса кислорода в теле человека. С течением времени оксид углерода вытесняет кислород из организма, возникает гипоксия (недостаток кислорода), которая сопровождается сонливостью и зачастую приводит к смерти.

Оксид углерода является продуктом неполного сгорания любого вида топлива, содержащего углерод (бензина, дизельного топлива, природного газа). Количество выделяемого оксида углерода в выхлопных газах варьируется и зависит от технического состояния автомобиля. При полном сгорании топлива образуются диоксид углерода и вода. Если кислорода в процессе горения не хватает, окисление органических веществ происходит не полностью и образуется недоокисленный оксид углерода CO. Состояние машин на всем постсоветском пространстве оставляет желать лучшего, а жесткого государственного регулирования состояния транспортных средств нет, это приводит к нередким случаям отравления выхлопными газами.

Постановка проблемы. Большое количество случаев отравления угарным газом происходит при работах, связанных с ремонтом и техническим

обслуживанием автомобилей в гаражах. Эти работы являются неотъемлемой процедурой большинства автомобилистов. Важно то, что автомобилисты часто делают мелкий ремонт машин непосредственно в гараже, а зимой они ежедневно «греют» там автомобили перед очередной поездкой. Система вентиляции обеспечивает постепенное удаление выхлопных газов, а на протяжении этого времени токсичные вещества пагубно воздействуют на организм человека. На основании этого возникает необходимость повысить эффективность работы и надежность системы вентиляции в паркингах, чтобы обеспечить безопасность людей.

Анализ последних исследований. Согласно работе [3] был исследован воздух в помещении стандартного гаража (размером 3×6 м, высотой 2,1 м) при работающем двигателе автомобиля. Измерения проводили газоанализатором, в гараже находился обычный отечественный автомобиль, технически исправный. Ворота гаража были открыты, температура наружного воздуха +20 °С. Получены следующие результаты. При работе автомобиля в течение 5 мин концентрация оксида углерода в помещении на высоте 1 м равнялась 160 мг/м³, при работе в течение 9 мин 300 мг/м³. Предельно допустимая концентрация (ПДК) оксида углерода в воздухе рабочей зоны 20 мг/м³. Через 5 мин работы двигателя автомобиля концентрация оксида углерода в гараже превысила ПДК в 8 раз. Эксперимент проводили при открытых воротах гаража. При закрытых концентрация оксида углерода через 5 мин достигла 380 мг/м³, то есть превысила ПДК почти в 20 раз. Рассмотрим изменения в организме человека, который мог бы находиться в этом автомобиле. При концентрации всего 13 мг/м³ через 7...8 мин в крови происходит изменение биологических и физиологических показателей. Если человек полчаса находится в помещении, где концентрация угарного газа равна 800 мг/м³, у него развивается тяжелое отравление с возможным летальным исходом.

Исходя из вышеизложенного можно сделать вывод, что автомобилист, производя любые действия при запущенном двигателе в ограниченном пространстве, будь то гараж или паркинг, подвергается вредному воздействию выхлопных газов, а при длительном воздействии рискует не только здоровьем, но и жизнью.

Цель исследования. Цель данной статьи – показать, что применение системы дымоудаления в качестве аварийной системы вентиляции для помещений паркингов повышает эффективность удаления выхлопных газов, вместе с тем снижает риск отравления токсичными компонентами и повышает уровень безопасности людей.

Материалы и результаты исследований. На подземных стоянках и в больших гаражах используют приточно-вытяжную систему вентиляции. В то время как в гаражах и на маленьких стоянках – только вытяжная вентиляция. В таких помещениях вентиляция исполняет функцию воздушного отопления. Для некрупных гаражей устанавливают вентиляцию по схеме 180...200 м³/ч из расчета на один автомобиль. Система вентиляции работает не постоянно и

обеспечивает кратность воздухообмена в пределах 2-3. Система дымоудаления в свою очередь обеспечивает кратность воздухообмена в пределах 7-10.

По методике из приложения 15 к СНиП 2.04.05-91 определим расход удаляемого дыма над загоревшимся автомобилем.

1. Пожарная опасность стоянки легковых автомобилей отнесена к категории В, поэтому средний удельный вес дыма при пожаре принят $g = 5 \text{ Н/м}^3$ и плотность $0,51 \text{ кг/м}^3$.

2. Высота помещений в местах проезда и хранения автомобилей и на путях эвакуации людей должна быть не менее 2 м от пола до выступающих конструкций и подвесного оборудования. При высоте помещения 2,5 м вертикальные завесы, ограждающие дымовые зоны, не должны спускаться ниже 2,0 м от пола. Глубина «резервуаров дыма» при этом будет зависеть от высоты конструкций перекрытия стоянки, и, как правило, будет не более 0,5 м.

3. Расход дыма, удаляемого из «резервуара дыма» над загоревшимся автомобилем, следует определять по периметру очага пожара, за который принимается периметр большего из размещаемых автомобилей с ограничением по приложению 22 к СНиП 2.04.05-91, где определен предельный периметр очага пожара 12 м. Максимальный расход дыма $G_{д_1}$, кг/ч, рекомендуют рассчитывать по формуле

$$G_{д_1} = 676,8 P_{п} U^{1,5} K_s, \quad (1)$$

где $P_{п}$ – периметр очага пожара, м; не более 12 м;

U – расчетный средний уровень стояния дыма от пола помещения, м, принимаемый в данном случае равным 2 м;

K_s – коэффициент, равный для вытяжных систем с искусственным побуждением (вентиляторы, эжекторы и др.), кг/ч; $K_s = 1 \text{ кг/ч}$.

Тогда максимальный расход дыма для стоянок легковых автомобилей при $K_s = 1 \text{ кг/ч}$ равен $G_{д_1} = 22970 \text{ кг/ч}$.

Объемный расход дыма $Q_{д_1}$, $\text{м}^3/\text{ч}$, определяют по формуле

$$Q_{д_1} = \frac{G_{д_1}}{\rho_{д_1}}, \quad (2)$$

где $\rho_{д_1}$ – плотность дыма, кг/м^3 .

Вычислим объемный расход дыма: $Q_{д_1} = 45039 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Исходя из расчета расход воздуха в системе дымоудаления значительно превышает расход системы вентиляции, а значит, система дымоудаления намного быстрее удалит продукты выхлопных газов и сократит до минимума

вредное воздействие токсичных веществ на организм человека. Предлагается использовать систему дымоудаления совместно с приборами для измерений концентраций СО и кратковременно включать в работу при превышении допустимого уровня концентрации оксида углерода.

Вывод. Для того чтобы сократить время воздействия на организм человека токсичных компонентов выхлопных газов, предлагается использовать систему дымоудаления. Она позволит быстро и эффективно удалить выхлопные газы, так как изначально рассчитана на большие объемы удаления продуктов сгорания при пожарах. Это сведет к минимуму время воздействия отравляющих компонентов выхлопных газов и обеспечит более высокий уровень безопасности людей, находящихся на подземных автостоянках. Система дымоудаления должна работать совместно с приточной вентиляцией и приборами для измерения концентрации. Использование системы дымоудаления как аварийной позволит повысить надежность системы вентиляции, не вкладывая значительных средств.

Список литературы / References

1. Автоцентр: журн. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.autocentre.ua/ac/practice/auto-market/dolya-dizelnykh-legkovushek-v-ukraine-rastet-dizelnaya-tendentsiya-21243.html> (дата обращения: 26.01.2016).

Autocentre: Journal [Electronic resource]. Available at: <http://www.autocentre.ua/ac/practice/auto-market/dolya-dizelnykh-legkovushek-v-ukraine-rastet-dizelnaya-tendentsiya-21243.html> (accessed 26.01.2016).

2. Абдакалик, М.К. Загрязнение атмосферного воздуха выбросами автотранспорта и влияние отработанных газов на здоровье населения [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.gsmu.by/file/ik/tokci/1.pdf> (дата обращения: 26.01.2016).

Abdakalikov, M.K. *Zagryazneniye atmosfernogo vozdukha vybrosami avtotransporta i vliyaniye otrabotannykh gazov na zdorov'ye naseleniya* [Atmospheric air pollution with motor transport emissions and influence of the exhaust gas emissions on the health of the population] (Electronic resource). Available at: <http://www.gsmu.by/file/ik/tokci/1.pdf> (accessed 26.01.2016).

3. Нуреева, О.Р. Угарный газ [Электронный ресурс]. – URL: http://www.ecospace.ru/ecology/science/ugarny_gaz/ (дата обращения: 04.04.2016).

Nureyeva, O.R. *Ugarnyy gaz* [Carbon monoxide] (Electronic resource). Available at: http://www.ecospace.ru/ecology/science/ugarny_gaz/ (accessed 04.04.2016).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 04.04.2016

Maxim Nikolayevich Bubela, engineer; e-mail: bubela.m@mail.ru;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-41-16

REMOVAL OF EXHAUST GASES FROM UNDERGROUND PARKING GARAGES

Purpose. To show the possibility of the use of a smoke removal system by cleaning the underground parking garages from harmful products of the fuel combustion.

Methods. Analytical generalization of the information on the problem of rise of the security level in the parking garages.

Results. It is proposed to use the smoke removal system as the emergency system for cleaning from the exhaust gases.

Novelty. Use of the smoke removal system in the complex with the combined extract-and-input system in the parking garages as well possibility of the use of the smoke removal system as the emergency ventilation system.

Practical value. The use of the smoke removal system for impoverishment of the exhaust gases what will allow cutting the time of influence of toxic substances on the human organism, minimizing the risk of poisoning with the exhaust gases, increasing the safety level and will permit to raise the level of its reliability by the use as the emergency system.

Keywords: *parking; exhaust gases; smoke removal system; ventilation; safety; motor transport; engines.*

III. Охрана труда

УДК 614.843.27:001.891.572

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

Николай Александрович Галухин, инж. I кат.; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru;

Элеонора Геннадиевна Чайковская, ведущий инж.; e-mail: niigd.osmas-4@mail.ru;

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-12-00*

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ «НАСОС – ПОЖАРНЫЙ РУКАВ – СТВОЛ»

Цель. Получение математических зависимостей распределения давления и расхода воды в длинной рукавной линии с учетом упругости стенок рукавов и упругости стенок корпуса насоса, сжимаемости перекачиваемой воды, инерционности жидкости и нестационарного процесса в ручном пожарном стволе.

Методика. Аналитические исследования на основе уравнения Навье-Стокса и нестационарного уравнения Бернулли.

Результаты. Получена система дифференциальных и алгебраических уравнений, связывающих распределение давления и расход воды от линейной координаты – длины рукавной линии с учетом краевых условий.

Практическая значимость. Полученная система уравнений позволяет оценить уровень скачкообразного повышения давления в рукавной линии и его влияние на пожарно-насосное оборудование. Учет таких колебаний давления при модернизации, проектировании и расчетах на прочность позволяет повысить надежность и долговечность пожарного оборудования.

Ключевые слова: *пожарный рукав; давление; расход воды; насос; моделирование.*

Постановка проблемы. Длинные пожарные рукава, оснащенные пожарным стволом, являются конечной частью последовательно соединенного с ними насосного агрегата. Большая длина рукавов, упругость материала стенок и большой объем заключенной в них водовоздушной смеси обуславливают возникновение динамических явлений при пуске насоса, коммутации потока воды, перегибе и заломе рукавов. Динамические явления сопровождаются волновыми процессами, забросами давлений, пульсацией воды на выходе из пожарного ствола, забросами сил реактивного действия струи на человека. Известно, что забросы давления в переходных режимах могут превышать стационарные значения в несколько раз и являются причиной повреждения насоса, рукавов, уплотнений соединительной арматуры.

Поэтому аналитическое описание динамических процессов в длинной рукавной линии позволяет получить зависимости распределения давления и расхода вдоль напорной линии (рис. 1), учесть влияние многочисленных факторов

на развитие волнового процесса, например, длины и диаметра рукава, материала рукава, что позволит выбрать такие параметры гидрوليнии, которые обеспечивают надежную работу всего пожарного оборудования.

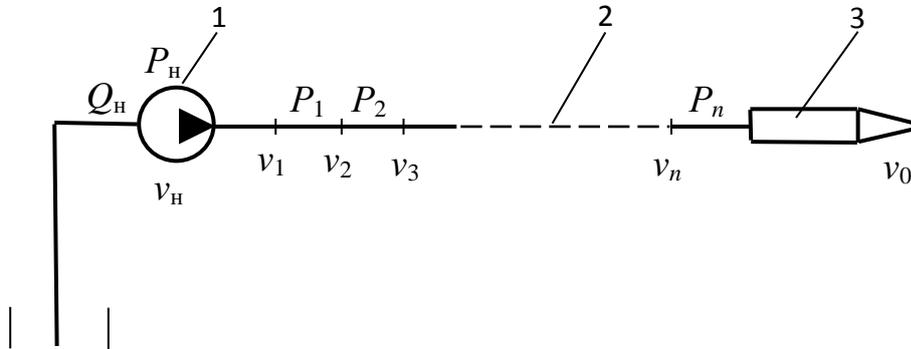


Рис. 1 Расчетная схема рукавной линии пожарного насоса:

1 – насос; 2 – рукавная линия; 3 – пожарный ствол

Результаты исследований. При описании динамических процессов, протекающих в длинных гидравлических линиях, приняты следующие допущения: скорость движения жидкости в линиях намного меньше скорости распространения звука, потери жидкости в линии отсутствуют, сила трения жидкости о стенки рукавов при нестационарном течении такая же, как и при стационарном, со скоростью, равной мгновенной скорости рассматриваемого процесса.

Длина рукавной линии l разбита на n равных отрезков:

$$\Delta l = l/n,$$

где Δl – длина отрезков разбиения, м;

l – длина пожарной рукавной линии, м;

n – количество отрезков разбиения.

Согласно [1] для каждого i -го отрезка справедлива система дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} -\frac{\partial P_i}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \xi_i v_i; \\ -\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = -\frac{1}{E_i} \frac{\partial P_i}{\partial t}, \end{cases} \quad (1)$$

где P_i – давление на i -м участке рукавной линии, Па;

v_i – скорость жидкости в i -м сечении рукавной линии, м/с;

- ρ – плотность жидкости, кг/м³;
 ξ_i – коэффициент местного сопротивления i -го участка, кг/(м³·с);
 $\xi_i = 32\rho\nu / d_i^2$;
 ν – коэффициент кинематической вязкости, м²/с;
 d_i – диаметр рукава в i -м сечении, м;
 E_i – приведенный модуль упругости на i -м участке рукава, Па.
 Приведенный модуль упругости определяется выражением

$$E_i = \frac{E_{ip}}{1 + \frac{d_i E_{ip}}{\delta_i E_{ж}}},$$

- где E_{ip} – модуль упругости материала рукава на i -м участке, Па;
 δ_i – толщина стенки рукава на i -м участке;
 $E_{ж}$ – модуль упругости перекачиваемой жидкости, Па.

Для приближенного численного решения уравнений (1) используют метод конечно-разностного преобразования уравнений в частных производных в обыкновенные дифференциальные уравнения. С учетом работ [1, 2] преобразованная математическая модель рукавной линии запишется в виде следующей системы обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dP_1}{dt} = \frac{E_1}{\Delta l} (v_1 - v_2); \\ \frac{dP_2}{dt} = \frac{E_2}{\Delta l} (v_2 - v_3); \\ \dots \\ \frac{dP_{n-1}}{dt} = \frac{E_n}{\Delta l} (v_{n-1} - v_n); \\ \frac{dv_1}{dt} = \frac{2}{\Delta l \rho} (P_n - P_1) - \frac{\xi_1 v_1}{\rho}; \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{\Delta l \rho} (P_1 - P_2) - \frac{\xi_2 v_2}{\rho}; \\ \dots \\ \frac{dv_n}{dt} = \frac{2}{\Delta l \rho} (P_{n-1} - P_n) - \frac{\xi_n v_n}{\rho}. \end{array} \right. \quad (2)$$

Для решения системы (2) ее необходимо дополнить граничными условиями значения давления на концах рукавной линии, то есть со стороны насоса и со стороны пожарного ствола. Упрощенное дифференциальное уравнение насоса запишем в виде

$$\frac{dP_H}{dt} = (v_H - v_1) \frac{aE_H}{V_H}, \quad (3)$$

где P_H – давление насоса, Па;

v_H – скорость жидкости на выходе из насоса, м/с;

E_H – приведенный модуль упругости материала стенок насоса и воды, Па;

V_H – объем жидкости в насосе, м³;

a – площадь сечения трубопровода, м².

Уравнение (3) устанавливает связь между параметрами насоса и рукавной линией.

Граничные условия со стороны пожарного ствола могут быть представлены в виде двух уравнений – уравнения неразрывности потока и нестационарного уравнения Бернулли. Уравнение неразрывности потока в пожарном стволе может быть записано в виде

$$v_0 = v_n \frac{a}{a_0} - \frac{V_c}{a_0 E_c} \frac{dP_n}{dt}, \quad (4)$$

где a_0 – площадь сечения насадка пожарного ствола, м²;

V_c – объем воды в пожарном стволе, м³;

v_0 – скорость выходной струи, м/с;

E_c – приведенный модуль упругости материала стенок ствола и воды, Па.

Поскольку в уравнении (4) появилась дополнительная неизвестная v_0 , то необходимо еще одно уравнение. Для этого воспользуемся нестационарным уравнением Бернулли, записанным относительно параметров двух сечений А и В, проходящих через начало входа в пожарный ствол и через выходной конец насадка (рис. 2):

$$P_n + \frac{\rho v_n^2}{2} = P_0 + \frac{\rho v_0^2}{2} + \rho \frac{dQ_c}{dt} \int_0^h \frac{dh}{F} + \rho g(1 + \varepsilon) S_H Q_c^2, \quad (5)$$

где $P_0 = 0$ – давление на выходе пожарного ствола;

Q_c – расход жидкости в пожарном стволе, м³/с;

F – функция переменного сечения пожарного ствола, м²;

ε – относительная величина – доля влияния направляющей части ствола на общее гидравлическое сопротивление;

S_H – гидравлическое сопротивление насадка пожарного ствола, с²/м⁵;

h – осевая координата ствола, м.

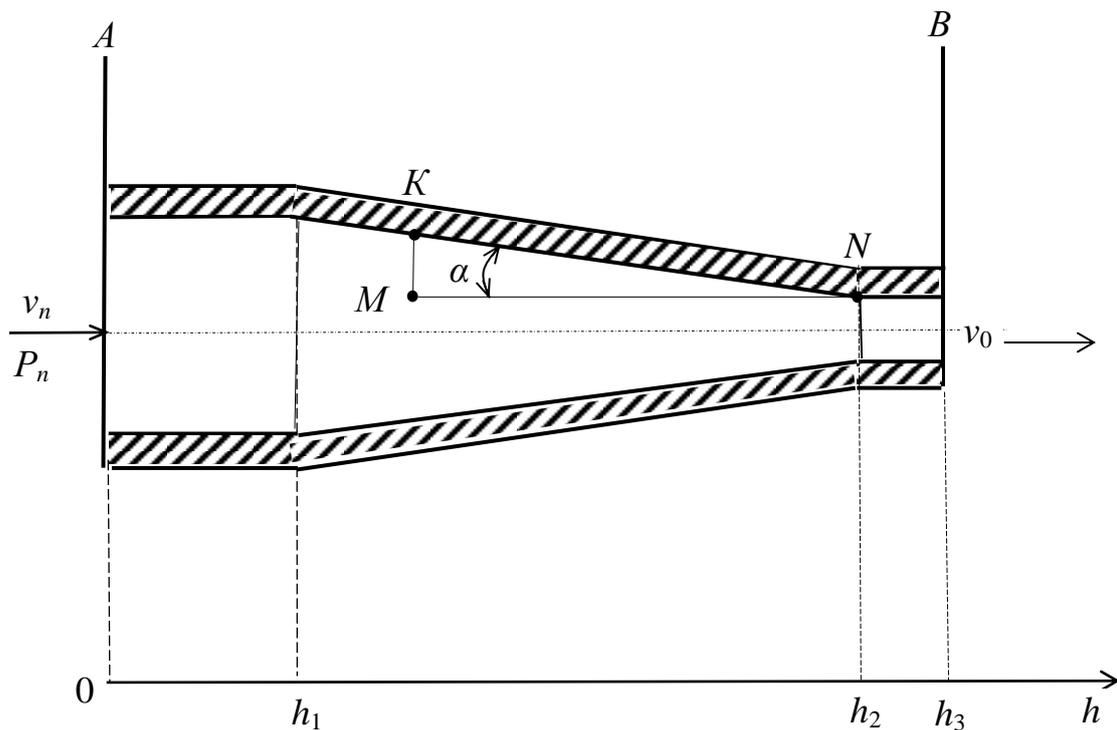


Рис. 2. Расчетная схема пожарного ствола

Коэффициент ε , согласно последним исследованиям [3], для пожарного ствола типа РС-50 равен 0,07, а полные сопротивления стволов с выходными отверстиями 16 и 19 мм соответственно равны $1,26 \cdot 10^{-6}$ и $0,634 \cdot 10^{-6}$ $\text{с}^2/\text{м}^5$. Последний член правой части уравнения (5) представляет собой потери давления в пожарном стволе, подсчитанные через сопротивление его насадка S_n . Третий член правой части уравнения (5) выражает потери давления на инерционный напор:

$$P_{\text{и}} = \rho \frac{dQ_c}{dt} \int_0^h \frac{dh}{F},$$

где $P_{\text{и}}$ – инерционный напор жидкости в объеме ствола, Па.

Нахождение $P_{\text{и}}$ предполагает точное знание функции площади сечения ствола F от его осевой координаты h . Согласно рис. 2 пожарный ствол может быть представлен в виде трех составных частей: входного цилиндрического патрубка (втулки), конической направляющей части и цилиндрического насадка-формирователя струи. Поэтому инерционный напор равен сумме трех инерционных напоров в характерных частях пожарного ствола:

$$P_{\text{и}} = \rho \frac{dQ_{\text{с}}}{dt} \int_0^{h_1} \frac{dh}{F_1} + \rho \frac{dQ_{\text{с}}}{dt} \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{F_2} + \rho \frac{dQ_{\text{с}}}{dt} \int_{h_2}^{h_3} \frac{dh}{F_3},$$

где h_1, h_2, h_3 – координаты характерных частей пожарного ствола, м;

F_1, F_2, F_3 – площади сечения характерных частей пожарного ствола как функции координаты h , м².

Нетрудно заметить, что начальный и концевой участки ствола являются цилиндрическими, а поэтому соответствующие площади F_1 и F_3 не зависят от h . Следовательно, инерционные напоры входного патрубка и насадка соответственно равны

$$P_{\text{ип}} = \rho \frac{dQ_{\text{с}}}{dt} \frac{\Delta h_1}{a};$$

$$P_{\text{ин}} = \rho \frac{dQ_{\text{с}}}{dt} \frac{\Delta h_3}{a_0},$$

где Δh_1 – длина входного цилиндрического патрубка, м;

Δh_3 – длина цилиндрического насадка, м.

Для нахождения инерционного напора конической части пожарного ствола рассмотрим ΔKNM (см. рис. 2). Угол $\angle KNM = \alpha$ – угол конусности ствола. Тогда переменный радиус R конической части ствола равен

$$R = KM + r,$$

где R – переменный радиус, м;

$KM = \text{tg}\alpha h$, м;

r – радиус насадка, м.

Соответственно переменный диаметр конической части ствола имеет вид

$$D = 2\text{tg}\alpha h + d,$$

где D – переменный диаметр конической части ствола, м;

d – диаметр насадка, м.

Поэтому площадь произвольного сечения конической части ствола равна

$$F_2 = \frac{\pi \left(2\text{tg}\alpha h + d \right)^2}{4}.$$

Следовательно, инерционный напор конической части ствола равен

$$P_{\text{ик}} = \rho \frac{dQ_c}{dt} \int_{h_1}^{h_2} \frac{4dh}{\pi(2\text{tg}\alpha h + d)^2} = \rho \frac{dQ_c}{dt} \int_0^{h_2 - h_1} \frac{4dh}{\pi(2\text{tg}\alpha h + d)^2}.$$

Учитывая, что $h_2 - h_1 = \Delta h_2$ – длина конической части ствола, получим

$$P_{\text{ик}} = \frac{4\rho\Delta h_2}{\pi d(2\text{tg}\alpha\Delta h_2 + d)} \frac{dQ_c}{dt}.$$

Обозначим

$$B = \frac{\rho\Delta h_1}{a} + \frac{\rho\Delta h_3}{a_o} + \frac{4\rho\Delta h_2}{\pi d(2\text{tg}\alpha\Delta h_2 + d)}$$

и окончательно получим выражение для полного инерционного напора пожарного ствола

$$P_{\text{и}} = B \frac{dQ_c}{dt}.$$

Тогда уравнение Бернулли запишется в виде (с учетом $Q_c = a_0 v_0$)

$$P_n + \frac{\rho v_n^2}{2} = \frac{\rho v_0^2}{2} + B a_0 \frac{dv_0}{dt} + \rho g a_0^2 (1 + \varepsilon) S_{\text{н}} v_0^2. \quad (6)$$

Начальные условия дифференциальных уравнений находятся из условия стационарности процессов, то есть при $\frac{dv_i}{dt} = 0$ и $\frac{dP_i}{dt} = 0$. Величины $v_i(0)$ и $P_i(0)$ находятся из решения системы алгебраических уравнений (2), (3), (4) и (6) при нулевых начальных значениях производных. Нестационарная реактивная сила струи, действующая на пожарного, находится как произведение перепада давления на ручном пожарном стволе и площади сечения устья ствола. В большинстве случаев площадь сечения устья ствола и пожарного рукава примерно равны, поэтому

$$N = P_n a,$$

где N – реактивная сила пожарной струи, Н.

Вывод. Используя приведенные выше дифференциальные и алгебраические уравнения для каждого участка дискретизированной рукавной линии, находят распределение давления и расхода воды вдоль осевой координаты гидрوليнии в переходном режиме. Имитационное моделирование позволяет оценить влияние многочисленных параметров как самой линии, так и конечного оборудования (насоса и пожарного ствола) на скачкообразное повышение давления, найти оптимальное соотношение этих параметров и таким образом повысить надежность и долговечность оборудования.

Список литературы / References

1. Дусанюк, Ж.П., Дерібо, О.В., Дусанюк, С.В. Вплив рукавів високого тиску на характер перехідних процесів в довгих трубопроводах гідроприводів технологічних машин // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 5. – С. 95 – 99.

Dusaniuk, Zh.P., Deribo, O.V., Dusaniuk, S.V. *Vplyv rukaviv vysokogo tysku na kharakter perekhidnykh protsesiv v dovykh truboprovodakh gidropryvodiv tekhnologichnykh mashyn* [Influence of the high-pressure hoses on the character of transient processes in long pipe-lines of hydraulic drives of production-friendly machines]. *Visnyk Vinnyts'kogo Politekhnichnogo Instytutu* [Bulletin of the Vinnytsya Polytechnical Institute]. 2008, no. 5, pp. 95 – 99.

2. Патанкар, С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 154 с.

Patankar, S. *Chislennyye metody resheniya zadach teploobmena i dinamiki zhidkosti* [Numerical methods of solution of the heat exchange and liquid dynamics problems]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1984, 154 p.

3. Качанов, И.В., Карпенчук, И.В., Красовский, А.И. Сопротивление пожарных стволов / [Электронный ресурс]. – URL: <http://rep.bntu.by//handle/data/1228?show=full> (дата обращения: 21.06.2016).

Kachanov, I.V., Karpenchuk, I.V., Krasovskiy, A.I. *Soprotivleniye pozharnykh stvolov* [Resistance of fire-hose barrels] (Electronic resource). Available at: URL: <http://rep.bntu.by//handle/data/1228?show=full> (accessed 21.06.2016).

Georgiy Ivanovich Peftibay, head of department; e-mail: niigd.osmas1@mail.ru;

Nikolay Aleksandrovich Galukhin, engineer of the 1st category; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru;

Eleonora Gennadiyevna Chaykovskaya, advanced engineer; e-mail: niigd.osmas4@mail.ru;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 062) 311-12-00

THE MATHEMATICAL DESCRIPTION OF TRANSIENT PROCESSES IN THE SYSTEM “PUMP - FIRE HOSE – FIRE-HOSE BARREL”

Purpose. Acquisition of mathematical dependences of distribution of the pressure and consumption of water in the long hose line subject to elasticity of walls of the hoses and elasticity of walls of the pump case, compressibility of water being pumped, sluggishness of the liquid and the non-stationary process in the hand fire-hose barrel.

Methods. Analytical investigations on the basis of the Navier-Stokes equation and the non-stationary Bernoulli equation.

Results. The system of the differential and algebraic equations linking the distribution of the pressure and consumption of water because of the translational axis, i.e. the length of the hose line, was received taking into account the boundary conditions.

Practical value. The set of equations received permits to estimate the level of the step-wise increase of the pressure in the hose line and its influence on the fire-pump equipment. The taking into account of such pressure fluctuations by modernization, projection and strength calculations allow increasing the safety and durability of the fire equipment.

Keywords: *fire hose; pressure; water consumption; pump; modeling.*

УДК 614.895.5:62-71

Геннадий Вячеславович Завьялов, науч. сотр.; e-mail: zavyalov57@mail.ua;

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, г. Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 095) 423-73-95*

ПАРАМЕТРЫ ВОДЯНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ПРОТИВОТЕПЛОВОГО КОСТЮМА СПАСАТЕЛЯ

Цель. Определить параметры водяного охлаждения противотеплового костюма спасателя для обеспечения безопасных условий ведения работ при тушении пожаров и выполнении аварийно-спасательных работ.

Методы. Теоретический метод на базе основных уравнений тепловых и гидравлических процессов при охлаждении противотеплового костюма спасателя водой по открытому циклу.

Результаты. На основании решения уравнения теплового баланса обоснованы параметры водяного охлаждения противотеплового костюма спасателя.

Научная новизна. Впервые теоретически обоснованы параметры водяного охлаждения противотеплового костюма спасателя на основании решения уравнения теплового баланса.

Ключевые слова: температура; спасатель; теплозащитная одежда; тепловой баланс; контур водяного охлаждения; параметры противотеплового костюма.

Проблема и ее связь с важными научными и практическими задачами.

Специальная защитная одежда от повышенных тепловых воздействий, используемая в подразделениях пожарно-спасательной службы МЧС, разработана на основе пассивного способа защиты. Этот способ предполагает применение нескольких слоев материалов, обладающих различными физико-химическими характеристиками, для снижения количества теплоты, проникающей снаружи в подкостюмное пространство. При этом разработчики устанавливали все более высокие температурные пределы, от которых противотепловая одежда призвана защищать спасателей. Наряду с этим, на практике, даже при показательных выступлениях, испытатели, использующие такие средства защиты, получали термические ожоги. В погоне за высокими показателями защитной одежды часто упускали вопросы комфорта и безопасности спасателей. Поэтому ГОСТ Р 53264-2009 «Специальная защитная одежда пожарного. Общие технические требования. Методы испытаний» требует, чтобы температура в подкостюмном пространстве не превышала плюс 50 °С. Несмотря на это, время защитного действия одежды пожарного весьма ограничено.

Результаты анализа последних исследований и публикаций. В ряде случаев в ходе испытания специальной одежды допускали возможность получения ожогов 2-й...3-й степени на площади до 5 % тела [1]. При этом не учитывали теплоту, выделяемую регенеративным патроном респиратора, с помощью которого в большинстве случаев при выполнении аварийно-спасательных работ приходилось защищать органы зрения и дыхания, а также

тело спасателя [2, 3]. К вопросу защиты спасателей от воздействия повышенных температурных воздействий при выполнении ими служебных обязанностей необходимо подходить с позиции сохранения здоровья и жизни, т.е. обеспечения их безопасности.

Формулирование цели работы и постановка задач. Цель – определить параметры водяного охлаждения противотеплового костюма спасателя для обеспечения безопасных условий ведения работ при тушении пожаров и выполнении аварийно-спасательных работ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать расчетную схему и исследовать тепловой баланс системы «окружающая среда – противотепловой костюм – спасатель»;
- определить необходимый расход воды, подаваемой в контур водяного охлаждения противотеплового костюма;
- рассчитать параметры дросселирующей шайбы устройства для отбора требуемого количества воды из рукавной линии;
- определить время защитного действия противотеплового костюма спасателя с водяным охлаждением открытого цикла.

Результаты исследований. Согласно физиолого-гигиеническим требованиям, предъявляемым к изолирующим средствам индивидуальной защиты, а также на основании результатов многочисленных экспериментальных исследований, полученных ранее [4, 5], температура в противотепловой одежде спасателей в зависимости от влажности под одеждой не должна превышать при выполнении работы средней тяжести 35...40 °С, а при выполнении тяжелой работы 34...38 °С. В связи с тем, что при температуре воздуха 40 °С и относительной влажности 70...80 % темп умственной работы сокращается в два раза, резко падает сосредоточенность внимания, количество ошибок увеличивается в 5...10 раз, при дальнейшем повышении температуры возрастает усталость, нарушается координация движений, значительно уменьшается осторожность [6].

При разработке нового противотеплового костюма спасателя с охлаждением водой по открытому циклу необходимо учитывать предельные значения вышеприведенных температур, особенно при 100 %-й влажности воздуха, которая достигает этого значения в изолирующей одежде за счет выделения пота.

Примем расчетную схему системы «окружающая среда – противотепловой костюм – спасатель» с водяным охлаждением по открытому контуру, представленную на рис. 1. Вода, подаваемая из рукавной линии с помощью устройства для ее отбора в контур водяного охлаждения, позволяет снижать температуру воздуха в подкостюмном пространстве.

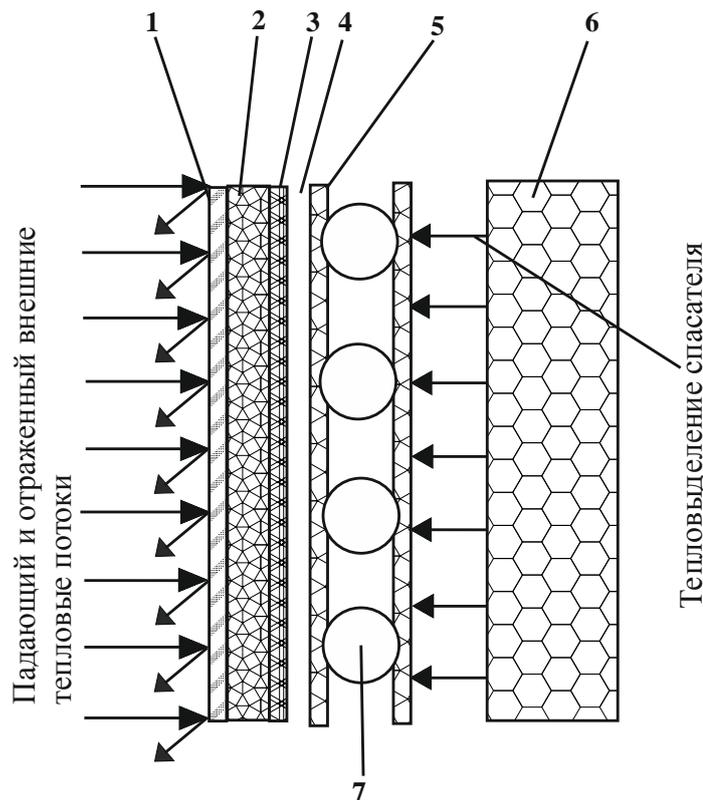


Рис. 1. Расчетная схема системы «окружающая среда – противотепловой костюм – спасатель»:

1 – наружный слой; 2 – теплоизолирующий слой; 3 – внутренний слой; 4 – воздушная прослойка; 5 – слой оболочки водяного охлаждения; 6 – тело спасателя; 7 – трубки с водяным охлаждением

Уравнение баланса тепловых потоков для противотеплового костюма с водяным охлаждением по открытому контуру представим в виде

$$q_{\text{в}} = q_{\text{н}} + q_{\text{с}} + q_{\text{р}} - \Delta q_{\text{д}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{в}}$ – общий тепловой поток, который необходимо отводить из подкостюмного пространства проточной водой, Вт;

$q_{\text{н}}$ – тепловой поток, поступающий из окружающей среды через оболочку костюма, Вт;

$q_{\text{с}}$ – тепловой поток, поступающий от спасателя, Вт;

$q_{\text{р}}$ – тепловой поток, выделяемый регенеративным патроном респиратора, Вт;

$\Delta q_{\text{д}}$ – тепловой поток, поглощаемый различными деталями в подкостюмном пространстве, Вт.

Определим составляющие уравнения теплового баланса.

Тепловой поток, поступающий из окружающей среды:

$$q_{\text{н}} = \frac{T_{\text{в}} - T_{\text{к}}}{R_{\text{к}} + R_{\text{в}}} S, \quad (2)$$

где T_B, T_K – температура воздуха окружающей среды и кожи человека соответственно, К;

S – площадь поверхности костюма, м²;

R_K, R_B – термическое сопротивление костюма и воздуха соответственно, м²·К/Вт.

Известно, что термическое сопротивление воздуха $R_g = 0,16$ м²·К/Вт.

Термическое сопротивление костюма характеризует проникающий через него тепловой поток при заданной толщине и теплопроводности материала и определяется по формуле

$$R_K = \delta/\lambda, \quad (3)$$

где δ – толщина слоя теплоизолирующего материала, м;

λ – коэффициент теплопроводности изолирующего материала, Вт/(м·К).

При исходных данных для базальтового супертонкого волокна $\lambda = 0,034$ Вт/(м·К), толщине $3 \cdot 10^{-2}$ м получим $R_K = 0,88$ м²·К/Вт.

Тогда при температурах наружного воздуха 473 К, тела 310 К и площади костюма 3 м² [3] по формуле (2) получим $q_n = 482$ Вт.

Тепловой поток, выделяемый телом спасателя, определим по его энергозатратам с учетом коэффициента полезного действия при выполнении работы:

$$q_c = q_э(1 - \mu), \quad (4)$$

где $q_э$ – энергозатраты человека, Вт;

μ – КПД спасателя.

При работе средней тяжести и выполнении работ в теплокамере энергозатраты спасателя равны 350 Вт [3, 4, 5]. Принимаем его КПД, равным 0,2. В этом случае тепловой поток $q_c = 280$ Вт.

Тепловой поток от регенеративного патрона респиратора с известковым химпоглопителем можно определить по формуле

$$q_p = \frac{q_э \kappa_d \rho_y Q_c}{\kappa_k \cdot 10^3}, \quad (5)$$

где $q_э$ – энергозатраты человека, Вт;

κ_d – дыхательный коэффициент;

ρ_y – плотность диоксида углерода, кг/м³;

Q_c – удельная теплота реакции поглощения диоксида углерода сорбентом, Дж/кг;

κ_k – энергетический эквивалент кислорода, Дж/л.

Согласно работе [7] принимаем следующие значения величин, входящих в формулу (5): $\kappa_d = 0,88$; $\rho_y = 1,976$ кг/м³; $\kappa_k = 20,5$ кДж/л.

Если в качестве сорбента применяется известковый химический поглотитель, то $Q_c = 2,3 \cdot 10^6$ Дж/кг [8]. В результате получим $q_p = 68$ Вт.

Поглощение теплоты за счет прироста энтальпии деталей в подкостюмном пространстве определим по формуле

$$\Delta q_d = m_d c_d \Delta t_d, \quad (6)$$

где m_d – масса деталей, нагревающихся в подкостюмном пространстве (респиратор, электрофонарь, радиостанция и др.), кг; принимаем $m_0 = 14$ кг;

c_d – средняя теплоемкость деталей, кДж/(кг·К); принимаем $c_d = 0,42$ кДж/(кг·К);

Δt_d – прирост температуры деталей подкостюмного пространства, К/ч.

Пусть детали подкостюмного пространства за первый час нагреваются от 20 до 30 °С, т.е. $\Delta t_d = 10$ К/ч. Тогда $\Delta q_d = 16$ Вт.

Подставив полученные данные в формулу (1), получим значение теплового потока q_v , который равен 814 Вт.

Расход воды G , л/мин, для обеспечения необходимого теплоотвода q_v , Вт, определим по формуле

$$G = \frac{3,6q_v}{\rho c_p \Delta t}, \quad (7)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³ ($\rho = 10^3$ кг/м³);

c_p – теплоемкость воды, кДж/(кг·К); $c_p = 4,187$ кДж/(кг·К);

Δt – градиент температуры воды на входе и выходе из системы водяного охлаждения, К.

Подставив данные в формулу (7), при $\Delta t = 3$ К, получим $G = 0,23$ м³/ч (3,88 л/мин).

Вода в систему водяного охлаждения противотеплового костюма подается через устройство в рукавной линии, устанавливаемое перед пожарным стволом (рис. 2).

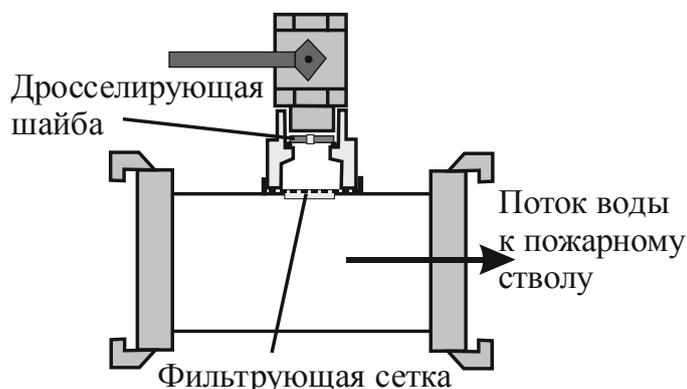


Рис 2. Устройство для отбора воды из рукавной линии

Определим диаметр дросселирующей шайбы по формуле

$$d = 3,16^4 \sqrt{G^2 / \Delta P}, \quad (8)$$

где ΔP – избыточное давление, МПа.

Приняв давление у пожарного ствола, равным 0,4 МПа, получим $d = 1,94 \cdot 10^{-3}$ м.

Время защитного действия противотеплового костюма τ , ч, определим по формуле

$$\tau = \frac{Q_{\text{вод}}}{3,6q_{\text{в}}}, \quad (9)$$

где $Q_{\text{вод}}$ – теплота, отводимая из подкостюмного пространства водой:

$$Q_{\text{вод}} = 60mC_p \Delta t. \quad (10)$$

С учетом исходных данных для воды $Q_{\text{вод}} = 2924$ кДж/ч, а из выражения (10) получим $\tau = 0,99$ ч (59,4 мин).

Аналогичные расчеты для ряда температур воздуха окружающей среды дают результаты, приведенные в таблице.

Зависимость времени защитного действия противотеплового костюма от температуры воздуха окружающей среды

$T_{\text{в}},$ К	$T_{\text{к}},$ К	$S,$ м ²	$q_{\text{н}},$ Вт	$q_{\text{т}},$ Вт	$q_{\text{р}},$ Вт	$\Delta q_{\text{д}},$ Вт	$q_{\text{в}},$ Вт	$Q_{\text{вод}},$ кДж/ч	$\tau,$ ч/мин
373	306	3	193	280	68	16	525	2924	1,55 / 93,0
423	306	3	338	280	68	16	670	2924	1,21 / 72,6
473	306	3	482	280	68	16	814	2924	0,99 / 59,4
523	306	3	770	280	68	16	958	2924	0,85 / 51,0

Учитывая теплосъем с различных участков тела спасателя [9], можно определить плотность размещения трубок контура водяного охлаждения, а также места расположения коллекторов для ввода и вывода хладагента.

Выводы

1. Исследован тепловой баланс системы «окружающая среда – противотепловой костюм – спасатель», в которой дополнительно учтены тепловой поток, выделяемый регенеративным патроном респиратора и поглощаемый различными деталями в подкостюмном пространстве, что

позволило определить тепловой поток, который необходимо отводить из подкостюмного пространства проточной водой.

2. Определен расход воды, подаваемой в водяное охлаждение противотеплового костюма для обеспечения безопасных условий работы при различных температурных режимах. При температуре окружающей среды 200 °С расход воды равен 3,88 л/мин.

3. Определены параметры дросселирующей шайбы устройства для отбора воды из рукавной линии. Диаметр отверстия шайбы, необходимый для вышеуказанного расхода воды при снижении давления от 0,4 до 0,375 МПа, равен $2 \cdot 10^{-3}$ м.

4. Установлена зависимость времени защитного действия противотеплового костюма с водяным охлаждением по открытому циклу от температуры окружающей среды и расхода подаваемой в него воды.

Список литературы / References

1. Одинцов, Л.Г., Запорожец, А.И., Карпов, В.Н. Специальная защитная одежда спасателей МЧС России // Гражданская защита. – 2002. – № 4. – С. 57 – 68.

Odintsov, L.G., Zaporozhets, A.I., Karpov, V.N. *Spetsial'naya zashchitnaya odezhda spasateley MChS Rossii* [The special protective clothing of rescuers of the Ministry of Emergency Situations (Russia)]. *Grazhdanskaya zashchita – Civil protection*, 2002, no. 4, pp. 57 – 68.

2. Бабалов, А.Ф. Защита от тепловых воздействий. – М.: Metallurgia, 1984. – 40 с.

Babalov, A.F. *Zashchita ot teplovykh vozdeystviy* [Protection against heat influences]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1984, 40 p.

3. Индивидуальная противогазотепловая защита: монография / Ю.Ф. Булгаков, С.В. Борщевский, И.Ф. Марийчук и др. – Донецк, 2015. – 385 с.

Bulgakov, Yu.F., Borshchevskiy, S.V., Mariyчук, I.Ph. etc. *Individual'naya protivogazoteplovaya zashchita: monografiya* [The individual gas and heat protection: monograph]. Donetsk, 2015, 385 p.

4. Энергозатраты членов аварийно-спасательных подразделений / И.Ф. Марийчук, О.В. Папазова, А.А. Онасенко, А.А. Гаврилко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2011. – Вып. 48. – С. 172 – 181.

Mariyчук, I.Ph., Papazova, O.V., Onasenko, A.A., Gavrillko, A.A. *Energozatraty chlenov avariyno-spasatel'nykh podrazdeleniy* [Power inputs of members of emergency rescue subdivisions]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2011, issue 48, pp. 172 – 181.

5. Вольский, В.А., Гаврилко, А.А., Марийчук, И.Ф. Энергетические показатели пожарных при передвижении в аварийной обстановке // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2003. – С. 51 – 55.

Vol'skiy, V.A., Gavrillko, A.A., Mariychuk, I.Ph. *Energeticheskiye pokazateli pozharnykh pri peredvizhenii v avariynoy obstanovke* [Energy characteristics of firemen by movement in an extreme emergency]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2003, pp. 51 – 55.

6. Багрова, Н.Д., Коваленко, В.П. Влияние высокой температуры на функциональное состояние организма и работоспособность // Военно-медицинский журн. – 1987. – № 4. – С. 35 – 36.

Bagrova, N.D., Kovalenko, V.P. *Vliyaniye vysokoy temperatury na funktsional'noye sostoyaniye organizma i rabotosposobnost'* [Influence of the high temperature on the functional state of the organism and capacity for work]. *Voyenno-meditsinskiy zhurn. – Military-medical journal*, 1987, no. 4, pp. 35 – 36.

7. Онасенко, А.А., Марийчук, И.Ф. Безопасность труда горнорабочих и членов ВГК шахты в экстремальных микроклиматических условиях // Уголь Украины. – 2004. – № 8. – С. 47 – 49.

Onasenko, A.A., Mariychuk, I.Ph. *Bezopasnost' truda gornorabochikh i chlenov V GK shakhty v ekstremal'nykh mikroklimaticheskikh usloviyakh* [Labor safety of mine workers and members of the auxiliary mine-rescue team of a mine under extreme microclimatic conditions]. *Ugol' Ukrainy – Coal of the Ukraine*, 2004, no. 8, pp. С. 47 – 49.

8. Диденко, Н.С. Регенеративные респираторы для горноспасательных работ. – М.: Недра, 1990. – 159 с.

Didenko, N.S. *Regenerativnyye respiratory dlya gornospasatel'nykh rabot* [Regenerative breathing apparatus for mine-rescue operations]. Moscow, Nedra Publ., 1990, 159 p.

9. Онасенко, А.А. Разработка средств индивидуальной противогазотепловой защиты горнорабочих: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. – Макеевка, 2007. – 187 с.

Onasenko, A.A. *Razrabotka sredstv individual'noy protivogazoteplovoy zashchity gornorabochikh*. Diss. cand. tekh. nauk: 05.26.01 [Working-out the individual gas and heat protection means of mine workers. Cand. tech. sci. diss.: 05.26.01]. Makeyevka, 2007, 187 p.

Gennadiy Vyacheslavovich Zav'yalov, scientific associate; e-mail: zavvalov57@mail.ua;

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyema. Phone (+38 095) 423-73-95

PARAMETERS OF THE WATER COOLING OF THE HEAT PROTECTIVE SUIT OF THE RESCUER

Purpose. To determine the parameters of the water cooling of the heat protective suit of the rescuer to guarantee the safe conditions of carrying-out the operations by fighting the fires and fulfillment of the salvage and rescue operations.

Methods. The theoretical method on the basis of the fundamental equations of heat and hydraulic processes when cooling the heat protective suit of the rescuer with water in compliance with the open cycle.

Results. The parameters of the water cooling of the heat protective suit of the rescuer are substantiated on the ground of the solution of the heat balance equation.

Scientific novelty. The parameters of the water cooling of the heat protective suit of the rescuer are theoretically substantiated for the first time on the ground of the solution of the heat balance equation.

Keywords: *temperature; rescuer; heat protective clothing; thermal balance; water cooling system; parameters of the heat protective suit.*

УДК 614.8:[355.58:159.923]

Елена Ивановна Добрякова, ведущий инж.; e-mail: kdom100@mail.ru;

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР;
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. +38 050 283 61 87; (+38 062) 311-41-16*

ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ПОВЕДЕНИЯ ЛЮДЕЙ В УСЛОВИЯХ ПОЖАРА

Цель. Разработка рекомендаций для повышения эффективности обучения населения правилам пожарной безопасности и принятию правильных решений при эвакуации из зоны пожара с учетом психологических особенностей реакции людей на экстремальные ситуации.

Методы. Аналитические методы обработки материалов Всемирного центра научной статистики по количеству пожаров и причинам их возникновения; изучение роли человеческого фактора в возникновении пожаров и результатов исследований психологических факторов, влияющих на поведение людей в условиях стрессовых ситуаций.

Результаты. Определен перечень вопросов, на которых необходимо акцентировать внимание слушателей во время проведения обучения для учета психологических особенностей поведения человека при пожаре.

Научная новизна. Разработана модель учета психологических особенностей поведения человека в условиях экстремальных ситуаций.

Практическая значимость. Использование рекомендаций по учету психологических особенностей поведения человека при пожаре повысит эффективность обучения, процент правильных решений в режиме недостатка времени.

Ключевые слова: *пожар; психология поведения; экстремальные ситуации; эвакуация; инструктаж; обучение; пожарно-технический минимум.*

Постановка проблемы. Рост количества погибших людей на пожарах свидетельствует о недостаточной информированности населения о правилах предотвращения пожаров и безопасного поведения в экстремальных ситуациях.

Анализ последних исследований. Вопросы низкой эффективности системы обучения рассматриваются в работе [1], при этом автор указывает на формализм проведения обучения, скудность информации при инструктаже. Автор считает, что в условиях быстроменяющейся ситуации оказать интеллектуальную поддержку при принятии решений невозможно. Это необходимо делать заблаговременно, без ограничения во времени, путем планирования возможных решений во время обучения с помощью компьютерных программ. Действительно, использование такой формы обучения целесообразно. В реальных условиях может рассматриваться как перспективное направление для развития.

Цель исследований. Разработка рекомендаций для повышения эффективности обучения с учетом психологических особенностей поведения человека при пожаре.

Материалы и результаты исследований. Актуальность повышения качества обучения правилам пожарной безопасности подтверждается статистическими данными о растущем количестве пожаров и пострадавших на них. По данным Всемирного центра пожарной статистики (Женева) и Центра пожарной статистики КТИФ, за один год в мире в среднем происходит 7-8 млн пожаров, на которых гибнет 85-90 тысяч человек и травмируется 600-800 тысяч человек [2]. В числе лидеров по количеству пожаров стоят высокоразвитые страны мирового сообщества. Пожары наносят не только экономический ущерб, но и уносят жизни людей (табл. 1).

Таблица 1

Среднее количество погибших при пожарах людей в 2008 г.
в некоторых странах мира

Страна	Население, тыс. чел.	Количество пожаров	Количество пожаров на 1000 чел. в год	Количество погибших	Количество погибших на 100000 чел. в год
США	305000	1451500	4,7	3320	1,0
Великобритания	60800	327448	5,4	327448	5,4
Франция	63714	312100	4,9	312100	4,9
Аргентина	40000	270000	6,7	270000	6,7
Италия	58148	236731	4,0	236731	4,0
Россия	141378	201706	1,4	15279	10,8
Индия	1129868	200000	0,2	20000	1,7
Китай	1321852	133000	0,1	1385	0,1
Германия	82438	183000	2,1	183000	2,1

Из анализа изложенного следует, что в Китае, США, Индии, Германии наименьшее количество погибших из расчета на 100000 чел. в год. Это свидетельствует об эффективности проводимого обучения правилам пожарной безопасности. Например, в Китае 500 тысяч человек являются членами 400 отрядов добровольных пожарных дружин, которые активно участвуют в противопожарной пропаганде. Широко используют средства массовой информации для ознакомления с правилами пожарной безопасности всех слоев населения. В США разработан и запатентован символ пожарной безопасности – медведь Смокки. Этот образ используют в регулярных телепрограммах по изучению правил пожарной безопасности для самых маленьких телезрителей и для взрослых. Наблюдается принцип многократности повторений и подключение аспекта творчества. В Китае перед Новым годом работники пожарной охраны устроили флешмоб, демонстрируя виртуозность в танцах в полной боевой экипировке; устроили конкурс на лучшее оформление пожарного гидранта, превратив изучение противопожарного оборудования в

интересную игру. Данные статистики подтверждают, что в мире более 5 % пожаров происходит в производственных и общественных зданиях, во время которых гибнет 10 % людей от общего количества погибших (рис. 1).



Рис. 1. Гибель людей на объектах пожаров в странах мира[2]

Как видно из приведенной диаграммы, в жилом секторе в среднем при пожарах гибнет 80 % людей от общего количества погибших. Анализ пожаров свидетельствует о человеческой небрежности по отношению к такой мощной стихии, как огонь. Среди причин возникновения пожаров лидирует неосторожное обращение с огнем. В среде работников пожарной охраны использовали термин «пьяный огонь». Человек в состоянии опьянения с сигаретой – непредсказуемый носитель экстремальных бед. Печальные последствия интереса детей к спичкам именуют «шалость детей с огнем». Что лежит в основе причин возникновения пожара – отсутствие знаний правил пожарной безопасности или небрежное к ним отношение? Чем можно помочь человеку избежать роковой встречи с пожаром и его последствиями – научить, каким способом это сделать по принципу «предупрежден, значит – вооружен». В основе государственной политики всех развитых стран мира вопрос предупреждения пожаров и ущерба от них занимает особое место и предусматривает не только разработку норм и правил безопасного строительства, эксплуатации зданий, сооружений и технологического оборудования, но и ознакомление с ними населения. Разрабатываются механизмы обучения, его виды и формы, направляются денежные средства на обеспечение повышения уровня знаний населения. Положительные результаты достигнуты на потенциально опасных объектах. Чем выше пожарная опасность производства, тем более жестко контролируется соблюдение правил пожарной безопасности и предусматриваются специальные виды обучения. Повысить

уровень знаний всего населения, независимо от возраста, сложнее, учитывая различную степень доступности к информации и заинтересованности в ее получении различных слоев общества.

Обучение учащихся и работающей части населения регламентируется законодательством в зависимости от рода деятельности и опасности производства и предусматривает различные виды инструктажей и прохождение специального обучения (в том числе пожарно-технического минимума). Разработаны учебные программы, определен законодательно принцип обучения с последующей проверкой знаний. Но, как показывает практика, стопроцентного усвоения материала не достигается. Что же не учтено при проведении обучения? Какие факторы влияют на психологическое состояние человека в экстремальных условиях?

Анализ последних исследований. В середине прошлого века опубликован ряд работ таких известных ученых, как J.I. Bryan, P.Q. Wood, R.B. Aronson, J. Nesup, В.И. Дугов, Ю. Зуев, которые изучали в условиях реальных пожаров и во время обучения изменение поведения людей и особенности восприятия информации в зависимости от внешних воздействий и субъективности восприятия. Авторы продемонстрировали, что реакция на стресс зависит от многих психологических факторов [3]. В модели поведения человека при пожаре исследователи рассматривают три этапа:

- получение сигнала и его восприятие;
- собственное поведение;
- дальнейшие последствия.

Варианты восприятия полученной информации о пожаре и реакцию на нее рассмотрим на рис. 2 и в табл. 2.

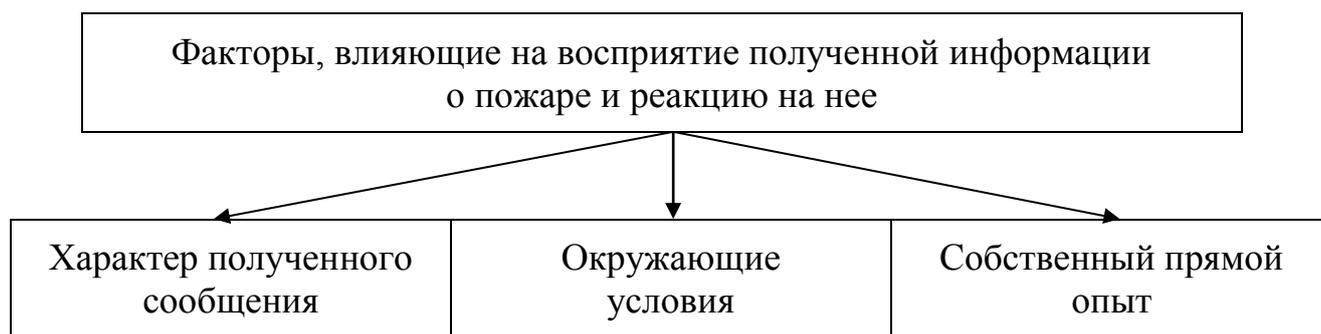


Рис. 2. Психологические аспекты реагирования на тревожные сигналы

Таблица 2

Реакция на сигнал

Способ получения сигнала	Реакция пострадавших на сигнал о пожаре	Время реагирования на сигнал о пожаре		Факторы, влияющие на скорость реакции
		по данным психологических исследований	в условиях реального пожара	
Звуковой сигнал	Действия по инструкции	100...200 мс	Замедленная реакция	1. При крайней опасности у человека появляется сужение объема восприятия, «пустые фиксации», разорванный характер мышления, снижается процесс понимания и синтеза информации, что характеризуется как механизм эмоциональной защиты 2. Наблюдается потеря чувства времени и замедление реакции
Срабатывание сигнализации	Реакция скептическая. 80 % воспринимают как учебную тревогу при отсутствии видимых признаков пожара и только 20 % эвакуируются из здания			

Следовательно, при повышении доверия к информации через осознанность риск пострадать во время пожара снижается. Другими словами, если каждый из нас будет осознавать, что при получении любого сигнала об опасности безопасней на него отреагировать, пусть даже сигнал ложный, чем в экстремальных условиях с измененным сознанием оказаться один на один с безжалостной стихией. Этот факт необходимо доводить до сознания людей. Влияние окружающей обстановки на реакцию человека отражено в табл. 3.

Таблица 3

Окружающие условия, влияющие на восприятие полученной информации о пожаре и реакцию на нее

Окружающие условия	Реакция на полученную информацию с учетом окружающих условий
Близость к очагу пожара	Чем ближе к очагу пожара и сильнее непосредственное переживание опасности, тем больше стремление эвакуироваться. Чем удаленнее от очага пожара, тем больше желающих позвонить в пожарную охрану, оказать помощь пострадавшим и принять участие в ликвидации пожара

Окончание табл. 3

Окружающие условия	Реакция на полученную информацию с учетом окружающих условий
Наличие дыма	Чем выше концентрация дыма, тем больше стремление эвакуироваться
Степень развития пожара	Чем выше степень развития пожара, тем больше стремление эвакуироваться
Количество эвакуационных выходов из здания	Чем больше эвакуационных выходов, тем больше желающих позвонить в пожарную охрану, оказать помощь пострадавшим и принять участие в ликвидации пожара
Знание конструктивных особенностей здания	При знании конструктивных особенностей здания количество желающих позвонить в пожарную охрану, оказать помощь пострадавшим и принять участие в ликвидации пожара повышается
Количество людей, находящихся в одном помещении, и состав группы	Если в помещении находится один человек, то вероятность того, что он вызовет пожарную охрану и будет эвакуироваться, выше. При большем количестве пострадавших в помещении наблюдается эффект переноса ответственности и ориентация на поведение других. Если более активный и статусный в организации человек, входящий в состав группы, предпринимает действия, заведомо ошибочные, остальные из состава группы будут стремиться их повторить. Предварительный инструктаж и обучение правилам поведения при пожаре повышает целенаправленность действий людей в условиях пожара. Особую значимость имеет обучение этим правилам сотрудников организации, разработка инструкции и ознакомление с ней
Субъективность восприятия информации	Поведение пострадавших во время пожара зависит от восприятия степени собственной безопасности

Как видно из табл. 3, люди в условиях пожара ведут себя уверенней, если убеждены в том, что эвакуационных выходов достаточно. К основным действиям, совершаемым пострадавшими в условиях пожара, относится эвакуация. Количество самостоятельно эвакуировавшихся из горящего здания колеблется от 20 до 54 %. По различным причинам отказываются от самостоятельной эвакуации приблизительно 45 % людей, находящихся в здании:

- считают, что опасность невелика;
- рассчитывают, что остаться в помещении безопасней, чем эвакуироваться;
- не слышат сообщение о пожаре.

Такая реакция людей свидетельствует о явной недооценке опасности [1]. При проведении обучения и инструктажей по правилам пожарной безопасности необходимо заострить внимание слушателей не только на пагубных последствиях недооценки ситуации, но и особенностях изменения психики в условиях повышенной опасности. Как показывают исследования, при слабом задымлении 95 % из опрошенных эвакуировались обычным маршрутом и испытывали страх перед передвижениями через незнакомые помещения. При сильном задымлении 38,5 % находящихся в здании людей пытались выбраться из окон. В условиях недостатка времени и наличия давления на психику через внешние раздражающие факторы человек способен принять правильное решение в том случае, когда алгоритм поведения заложен заранее на подсознательном уровне путем неоднократных повторений и воздействий на различные рецепторы: зрение, слух и т.д. (в том числе с использованием «шоковой терапии» специализированных телепрограмм с анализом конкретных пожаров и расстановкой акцентов на причинах гибели людей). Единственным возможным решением является заблаговременное, без ограничения во времени, планирование возможных вариантов спасения во время обучения [4].

Выводы и перспективы дальнейших научных разработок в данном направлении. Для повышения эффективности обучения населения правилам пожарной безопасности необходимо уходить от формализма в виде сбора подписи в журналах учета инструктажей. Использование тестовых программ для изучения правил и проверки степени ее усвоения позволит: ввести индивидуальный подход, обеспечить многократность повторения и возможность перевода информации на подсознательный уровень, а также значительно повысит скорость реагирования и алгоритм принятия правильных решений при возникновении экстремальной ситуации.

Как следует из источников [1, 3, 4], в режиме недостатка времени в условиях пожара человек успеет использовать только информацию, заложенную в подсознание. Хорошие результаты для запоминания дают яркие картинки при изучении трагических последствий на реальных пожарах путем фиксации типичных фатальных ошибок. Так, при проведении обучения и инструктажей по правилам пожарной безопасности необходимо заострить внимание слушателей не только на пагубных последствиях недооценки ситуации, но и особенностях изменения психики в условиях повышенной опасности, четко определять порядок действий в случае возникновения пожара. Можно рекомендовать следующие основные правила эвакуации:

в первую очередь о возникновении пожара по телефону сообщайте в пожарную охрану, а не близким и знакомым, не находящимся с вами в одном здании;

постарайтесь отбросить панические мысли. От вашей собранности зависит ваша жизнь;

оцените обстановку с точки зрения степени опасности. Если вы находитесь в помещении с закрытой дверью, проверьте температуру ручки двери (учтите возможность ожога). Если ручка холодная – можете осторожно открыть дверь. При отсутствии видимости из-за дыма в пределах 10 м выходить не рекомендуется. Стены, дверь имеют определенный предел огнестойкости, что дает вам временной бонус. Щели двери желательно уплотнить для защиты от дыма. Для защиты дыхательных путей от высокой температуры можно использовать плотную хлопчатобумажную ткань, свернутую в несколько слоев. Верхний слой импровизированной повязки желательно смочить водой. Изучите возможность эвакуации, в крайнем случае, через окно. Не забывайте о высоте здания и особенностях конструктивной части фасада. Материал, используемый для страховки, проверьте на прочность. Закрепите один конец этого материала (например, если батарея металлическая, крепите к ней). Во время движения вниз не скользите руками по материалу, чтобы не содрать кожу ладоней. Используйте фиксацию, как это делают альпинисты или дети при лазании по канату;

рассмотрите возможность выхода из здания, если видимость на пути эвакуации более 10 м. В этом случае важно знание пути эвакуации. Нужно помнить, что концентрация дыма наибольшая у потолка. Поэтому передвигайтесь, наклонившись к полу и касаясь стены для исключения потери ориентации. Будьте внимательны, на пути движения могут находиться различные предметы. Не забудьте о возможности защиты дыхания повязкой из хлопчатобумажной ткани, как описано выше.

При проведении обучения необходимо отмечать, что человеческий фактор лежит в основе не только причины возникновения пожара, но и определяет степень его распространения. Работники пожарной охраны, прибывшие на место пожара, имеют дело уже с разыгравшейся стихией огня, а свидетель возникновения пожара наблюдает его зарождение. Поэтому от его реакции зависит очень многое – можно ликвидировать загорание, а можно убежать. Практика показывает, что в экстремальных условиях человек может ликвидировать пожар только в том случае, когда четко понимает, какое загорание, какими первичными средствами пожаротушения можно

ликвидировать. Знание конструктивных особенностей здания и уверенность в достаточном количестве и безопасности путей эвакуации увеличивает количество людей, готовых принимать участие в ликвидации загорания и оказании помощи пострадавшим. Из этого следует, что во время обучения необходимо практически отработать все возможные пути эвакуации, изучить места расположения первичных средств пожаротушения и принцип их работы.

Список литературы

1. Евграфов, П.М., Нестеров, А.Н., Нестерова, О.В. Подготовка населения к действиям при пожарах как единая информационно-техническая и психологическая проблема // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – Т. 17, № 5. – С. 5 – 16.

Yevgrafov, P.M., Nesterov, A.N., Nesterova, O.V. *Podgotovka naseleniya k deystviyam pri pozharakh kak yedinaya informatsionno-tekhnicheskaya i psikhologicheskaya problema* [Preparation of population for operation by fires as the common information-technical and psychological problem]. *Pozharovzryvobesopasnost' – Fire-explosion safety*, 2008, vol. 17, no. 5, pp. 5 – 16.

2. Зачем нужна пожарная статистика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://albrus-ssv.narod.ru/r_stat.htm (дата обращения: 04.04.2016).

Zachem nuzhna pozharnaya statistika [What for is the fire statistics necessary?] (Electronic resource). Available at: http://albrus-ssv.narod.ru/r_stat.htm (accessed 04.04.2016).

3. Дутов, В.И. Психологические и гигиенические аспекты деятельности человека при пожаре. – М.: Изд-во Специализированного научно-практического центра экстренной медицинской помощи «Защита», 1993. – 300 с.

Dutov, V.I. *Psikhologicheskiye i gigiyenicheskiye aspekty deyatel'nosti cheloveka pri pozhare* [Psychological and hygienic aspects of activity of a man by a fire]. Moscow, Spetsializirovannyy nauchno-prakticheskiy tsentr ekstremnoy meditsinskoй pomoshchi “Zashchita” Publ., 1993, 300 p.

4. Евграфов, П.М. Система интеллектуальной поддержки принятия решений при пожаре // Пожаровзрывобезопасность. – 2006. – Т. 15, № 4. – С. 10 – 18. Т.15, № 5. – С. 15 – 21.

Yevgrafov, P.M. *Sistema intellektual'noy podderzhki prinyatiya resheniy pri pozhare* [System of the intellectual support of decision-making by a fire]. *Pozharovzryvobesopasnost' – Fire-explosion safety*, 2006, vol. 15, no. 4, pp. 10 – 18; vol. 15, no. 5, pp. 15 – 21.

Yelena Ivanovna Dobryakova, advanced engineer; e-mail: kdom100@mail.ru;

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

283048, Donetsk, 157, Artyem st. Phones (+38 050) 283 61 87; (+38 062) 311-41-16

PSYCHOLOGICAL ASPECTS OF BEHAVIOR OF THE PEOPLE UNDER FIRE CONDITIONS

Purpose. Working-out the recommendations for increase of effectiveness of instruction of population in preventive fire-fighting regulations and making right decisions by evacuation out of the fire zone taking into account the psychological peculiarities of the response of the people on extreme situations.

Methods. The analytical methods of processing the materials of the World Centre of Scientific Statistics concerning the number of fires and causes of their origin; examination of the role of the human factor in origin of the fires and that one of the results of investigations of psychological factors influencing on the behavior of the people under conditions of the stress situations.

Results. The list of the questions, which the attention of the listeners should be emphasized at when carrying-out the instruction, is determined to register the psychological peculiarities of the behavior of the man by the fire.

Scientific novelty. The model of registration of the psychological peculiarities of the man under conditions of the extreme situations was worked out.

Practical value. The use of the recommendations on registration of the psychological peculiarities of the behavior of the man by the fire will raise the instruction efficiency, the percentage of the right decisions in the regime of lack of time.

Keywords: *fire; psychology of behavior; extreme situations; evacuation; instruction; education; fire-technical minimum.*

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЬИ

Для рассмотрения принимаем только научные статьи, которые имеют такие необходимые элементы: постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами; анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение не решенных раньше частей общей проблемы, которым посвящена данная статья; формулирование целей статьи (постановка задачи); изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов; выводы из данного исследования и перспективы дальнейших работ в этом направлении.

Текст рукописи статьи (7–8 страниц, включая таблицы, рисунки) разместить на белой бумаге формата А4 (210×297 мм) с полями: верхнее и нижнее 20 мм, левое 25 мм и правое 15 мм. Страницы не нумеровать (нумерацию выполнить карандашом), на последней странице – подписи авторов. Рукопись статьи оформить с применением редактора Win Word (не ниже версии 7.0), шрифтом Times New Roman, кегль 14, распечатать в одном экземпляре с высоким качеством печати (через полтора интервала) без переносов.

Порядок оформления: слева, не отступая от верхнего поля, печатать УДК; имена, отчества и фамилии авторов (не более четырех), сведения об ученой степени, должности, адрес электронной почты; наименование организации, почтовый адрес её, номер телефона; название статьи печатать прописными буквами (жирным шрифтом) без переносов, аннотация и ключевые слова (5–15). Сведения, содержащиеся в заглавии, не следует повторять в тексте аннотации. Избегать лишних вводных фраз (например, «автор статьи рассматривает...»). Исторические справки, описание ранее опубликованных работ и общеизвестные положения в аннотации не приводятся.

Каждый графический объект (рисунок, график, схема, фотография) следует представлять с разрешением не менее 300 dpi в формате *.gif, *.jpg. Все позиции, обозначения и надписи, показанные на рисунке, должны быть набраны печатными буквами, позиции – расположены по часовой стрелке и объяснены. Под каждым рисунком указывается его номер и название. 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.

Заявление о соблюдении редакционной этики

Редакционная коллегия журнала определяет для себя следующие правила профессиональной этики.

Для авторов

1. Соблюдать нормы авторского права.
2. Фальсификацию данных, плагиат рассматривать как нарушение кодекса чести.
3. Не представлять в редакцию ранее опубликованные работы.
4. Обеспечивать возможность проверки полученных результатов другими исследователями путем понятного изложения аргументации поставленного вопроса, а также методов (способов, подходов).

Для редакторов

1. Ориентироваться на интересы читателей и авторов.
2. Обеспечивать высокое качество редактирования, оформления и представления публикуемых материалов.
3. Содействовать свободному выражению мнений на страницах журнала.
4. Следовать принципам открытости, научной честности и независимости по отношению к авторам, рецензентам и читательской аудитории.

Для рецензентов

1. Выполнять принятые на себя обязательства по рецензированию рукописей добросовестно, в установленные сроки и только в пределах профессиональной компетенции.
2. При написании рецензии следовать принципам объективности, конструктивности, непредубежденности и корректности.
3. Соблюдать конфиденциальность рецензии и не допускать возможности использования информации, полученной в ходе рецензирования, в каких-либо целях (за исключением целей, связанных с публикацией).
4. Избегать любых возможных конфликтов интересов.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2016, № 4 (53)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик О.А. Шестакова

Верстальщик Т.Н. Филатова

Основатель и издатель

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

Поступившие на издание статьи проходят рецензирование

Подписано к использованию 07.10.2016.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+38 062) 311-69-52; 311-31-47

Объем 8,1 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата публикации выпуска 01 ноября 2016 г.