



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 3(55)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2018

УДК 614.8"363"+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2018. – № 3(55). – 120 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук	В.Г. Агеев – главный редактор
д-р техн. наук	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.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.А. Канин
д-р техн. наук	К.Н. Лабинский
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
д-р техн. наук	В.Г. Сынков
канд. техн. наук	В.С. Харьковский (Республика Казахстан)

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 5 от 28.06.2018).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”

Scientific-technical journal

No. 3(55)

Published quarterly

Found in 1970

Donetsk
2018

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2018. – No. 3(55). – 120 p.

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

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

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

Editorial board:

Dr. 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.P. Grekov
Dr. Sci. (Tech.)	A.F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Igishev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	V.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
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
Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Synkov
Cand. Sci. (Tech.)	V.S. Kharkovskiy (Republic of Kazakhstan)

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 5 from 28.06.2018).

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

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

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

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

Агеев В.Г., Пефтибай Г.И.
Напряженно-деформированное
состояние взрывоустойчивой
перемычки под действием
ударных волн 7

Пашковский П.С.
Температурные условия устойчивого
пенообразования на сетках 19

**Греков С.П., Зинченко И.Н.,
Глушенко К.В.**
Тепловая депрессия при
самонагревании скопления зерна 28

Добрякова Е.И.
Локализация низовых лесных пожаров 39

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

**Старикова И.Г., Зинченко И.Н.,
Глушенко К.В., Подрухин А.А.**
Фильтрация воздуха в скоплении
зернистого вещества растительного
происхождения 47

Глушенко К.В.
Кинетические параметры теплоотдачи
при самонагревании органического
вещества 58

Козлитин А.А., Лебедева В.В.
Обнаружение и идентификация
остатков нефтепродуктов после
пожаров 68

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

Ageyev V.G., Peftibay G.I.
The dynamic deflected mode
of an explosion-stable stopping under
influence of shock waves

Pashkovskiy P.S
Temperature conditions of the steady
foaming on nets

**Grekov S.P., Zinchenko I.N.,
Hlushenko K.V.**
Thermal drop of ventilation pressure
by spontaneous heating the grain
accumulation

Dobryakova Ye.I.
Localization of creeping forest fires

II. Safety in emergencies

**Starikova I.G., Zinchenko I.N.,
Hlushenko K.V., Podrukhin A.A.**
Air filtration in the granular vegetable
substance accumulation

Hlushenko K.V.
Kinetic parameters and heat-transfer
coefficients by the spontaneous heating
of an organic substance

Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.
Detection and identification of oil products
residua after fires

Бабенко Е.В. Прогнозирование чрезвычайных ситуаций техногенного характера	74	Babenko Ye.V. Forecast of emergency situations of an anthropogenic character	
III. Охрана труда и экологическая безопасность		III. Labor protection and environmental safety	
Высоцкий С.П., Козырь Д.А. Дистанционный контроль теплового состояния породных отвалов	84	Vysotsky S.P., Kozyr D.A. Remote control of the thermal state of waste dumps	
Новиков А.О., Дрипан П.С. Математическая модель внедрения анкера в породный массив под нагрузкой	91	Novikov A.O., Dripan P.S. The mathematical model of penetration of an anchor into the massif under load	
Медгаус В.М., Клычков А.А., Сынков Д.В., Реутов Д.В. Взаимодействие спасательного устройства с человеком при его падении с высоты	102	Medgaus V.M., Klychkov A.A., Synkov V.G., Reutov D.V. Interaction of a life-saving appliance with a man by his fall from a height	
Момот Д.И., Орликова В.П., Пашковский О.П. Влияние породных отвалов на окружающую среду	110	Momot D.I., Orlikova V.P. Pashkovskiy O.P. Influence of waste dumps on the environment	
Требования к оформлению статьи	119	Requirements of execution of an article	

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК [622.868.4:534.222.2]:001.891.572

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

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-36*

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ВЗРЫВОУСТОЙЧИВОЙ ПЕРЕМЫЧКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ УДАРНЫХ ВОЛН

Цель. Разработать математическую модель состояния взрывоустойчивой перемычки под действием ударных волн, а также температуры в выработках угольных шахт с учетом жесткого или шарнирного крепления для определения ее параметров, обеспечивающих безопасную работу горноспасателей при локализации взрывов метана, угольной пыли и пожаров.

Методика. Теоретический метод исследований с использованием основных законов теории анизотропных пластин и вариационного метода решения краевых задач в механике.

Результаты. Получены уравнения для определения напряжений, возникающих в перемычке в зависимости от ее геометрических параметров, механических характеристик материала, действующей нагрузки и температуры, условий крепления.

Научная новизна. Впервые принята расчетная схема взрывоустойчивой перемычки в виде пластины с радиусом, меняющимся по параболическому закону, с защемленными или шарнирно опертыми краями под действием нагрузки от ударной волны и температуры, поперечные деформации сдвига и внутренние силы в которой меняются по квадратичному закону.

Практическая значимость. Приведенная и ранее разработанная математические модели напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием ударной волны, температуры и горного давления позволят определить параметры, обеспечивающие прочность перемычки, устойчивость и безопасность горноспасателей при ликвидации аварий в горных выработках угольных шахт.

Ключевые слова: *горная выработка; ударная волна; взрывоустойчивая перемычка; нагрузка; температура; вариационный метод; напряжения; параметры.*

Постановка проблемы. Наиболее опасны по последствиям в угольных шахтах аварии, связанные с воспламенением метана и угольной пыли, подземные пожары и взрывы, что приводит к нарушению ритмичности угледобычи, большим материальным затратам, потере здоровья, иногда жизни горнорабочих и горноспасателей. Поэтому в течение десятилетий ученые постоянно проводили исследования и разрабатывали новые технологии и средства взрывоподавления в горных выработках [1].

Изолируют пожары в шахтах, опасных по взрывам газа и угольной пыли, взрывоустойчивыми перемычками, возведенными гидромеханическим способом с применением различных материалов [2, 3], но в основном гипсовых вяжущих. Взрывоустойчивые перемычки сооружают с проемными металлическими трубами, предназначенными для проветривания аварийной

выработки. При угрозе взрыва горноспасатели закрывают взрывоустойчивый клапан (люк) проемной трубы для полной изоляции участка [1].

Основная техническая характеристика взрывоустойчивой перемычки, от которой зависит трудоемкость ее возведения и безопасность горноспасателей при ликвидации аварий, – толщина перемычки.

Анализ последних исследований. В работах [1, 4, 5] приведена расчетная схема взрывоустойчивой перемычки в виде плиты с радиусом, меняющимся по параболической зависимости или полуокружности, с защемленными краями по основному контуру и свободным краем в верхней ее части, под действием нагрузки от воздушных ударных волн и сжимающей – разрушенных пород. Для исследований ее напряженно-деформированного состояния использован энергетический метод теории упругости, в основе которого применен прием, состоящий в представлении полного прогиба плиты в виде суммы двух составляющих – за счет изгиба и сдвига. При этом приведены зависимости для напряжений, учитывающие влияние проемных отверстий как концентраторов напряжений, увеличивающих максимальные напряжения до 30 %, без учета крепления металлическими трубами, что существенно усложнило решение задачи.

Результаты получены на основании определения максимальных напряжений, возникающих на ее свободном верхнем крае при действии разрушенных пород и нагрузки от ударной волны, принятой равной 2,8 МПа [1], без учета повторного воздействия отражающей волны и других условий крепления перемычки, а также температуры нагревания, которая в момент воздействия достигает более 10^3 °С и снижается в дальнейшем до 50 °С. Следует отметить, что температура окружающей среды непосредственно влияет на прочностные параметры изолирующих сооружений [6].

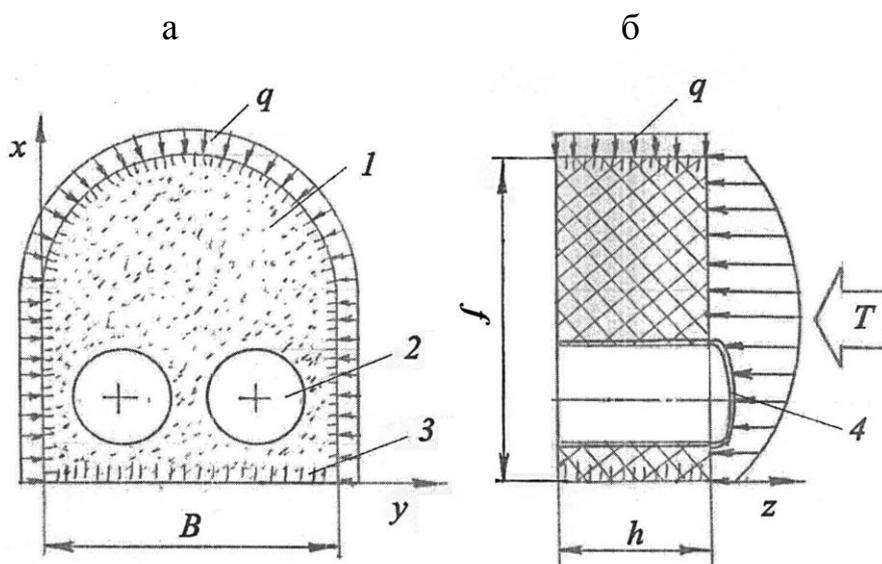
Практика эксплуатации перемычек показывает, что после первого воздействия на них ударной волны возможны изменения крепления, которые повлияют на напряженно-деформированное состояние при повторном применении.

Цель исследований – разработать математическую модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием ударной волны и температуры в выработках угольных шахт с учетом жесткого или шарнирного крепления для определения ее параметров, обеспечивающих безопасную работу горноспасателей при локализации взрывов метана, угольной пыли и пожаров.

Материалы и результаты исследований. Ранее разработана математическая модель начального напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки (далее – перемычки) под действием горного давления, получены зависимости для напряжений, которые являются составной частью решения данной задачи [7].

Рассмотрим расчетную схему перемычки в общем виде под действием нормально приложенной нагрузки q_z , края которой жестко защемлены, как

принято в работах [1, 4, 5], а также шарнирно опертые в результате нарушения крепления при воздействии нагрузки и температуры (см. рисунок).



Расчетная схема взрывоустойчивой перемычки:

а – в плане; б – вид сбоку;

1 – перемычка; 2 – проемная труба; 3 – контур заземления или шарнирного крепления; 4 – взрывоустойчивый клапан (люк); q – нагрузка от горного давления; q_z – нагрузка от ударной волны; T – температура

При выводе основных уравнений примем следующие допущения:

- рассматриваем малые упругие деформации пластины;
- влиянием проемных отверстий, подкрепленных двумя металлическими трубами, на напряженно-деформированное состояние перемычки пренебрегаем, так как предварительные результаты исследований при моделировании методом эквивалентных материалов показали, что перемещения сплошной и с проемными трубами практически равны [8];

- в связи с тем, что толщина перемычки соизмерима с минимальным параметром в плане (высотой), более точное решение задачи получают в случае, когда поперечные деформации сдвига и внутренние силы меняются по квадратичному закону [9].

Деформации пластины от изгиба ε_x и сдвига ε_y имеют вид [1]

$$\varepsilon_x = z\chi_1; \quad \varepsilon_y = z\chi_2, \quad (1)$$

$$\varepsilon_{xy} = 2z\tau; \quad \varepsilon_{xz} = \frac{a_{55}}{2} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \varphi; \quad \varepsilon_{yz} = \frac{a_{44}}{2} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \psi, \quad (2)$$

где z – координата по нормали, расположенная посередине пластины, м;

χ_1, χ_2, τ – параметры кривизны, возникающие в направлении x, y и в плоскости соответственно, м^{-1} ;

$\varepsilon_{xy}, \varepsilon_{xz}, \varepsilon_{yz}$ – касательные деформации, возникающие в плоскостях пластины;

h – толщина пластины, м ;

$a_{44} \dots a_{55}$ – упругие коэффициенты на сдвиг, м/Н .

$$\varphi = - \left[B_{11} \frac{\partial^3 w}{\partial x^3} + (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial x \partial y^2} \right]; \quad (3)$$

$$\psi = - \left[B_{22} \frac{\partial^3 w}{\partial y^3} + (B_{12} + 2B_{66}) \frac{\partial^3 w}{\partial y \partial x^2} \right], \quad (4)$$

где $B_{11} \dots B_{66}$ – коэффициенты жесткости на растяжение (сжатие) и сдвиг, $\text{Н} \cdot \text{м}^{-1}$;

W – перемещения, возникающие по нормали к пластине, м .

Параметры изменения кривизны χ_1, χ_2, τ , поперечные силы N_1, N_2 , изгибающие M_1, M_2 и крутящий M_{12} моменты запишем соответственно в виде

$$\chi_1 = \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \quad \chi_2 = \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \quad \tau = \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \quad (5)$$

$$N_1 = \frac{h^3}{12} \varphi; \quad N_2 = \frac{h^3}{12} \psi; \quad (6)$$

$$M_1 = D_{11} \chi_1 + D_{12} \chi_2; \quad M_2 = D_{12} \chi_1 + D_{22} \chi_2; \quad M_{12} = 2D_{12}^* \tau, \quad (7)$$

где $D_{11} \dots D_{22}$ – коэффициенты жесткости на изгиб, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

Компоненты тензора напряжений имеют вид

$$\sigma_x = -z \left(B_{11} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + B_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{R} B_{12} w; \quad (8)$$

$$\sigma_y = -z \left(B_{22} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + B_{12} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) + \frac{1}{R} B_{22} w; \quad (9)$$

$$\tau_{xy} = -2z B_{66} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}; \quad \tau_{xz} = \frac{1}{2} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \varphi; \quad \tau_{yz} = \frac{1}{2} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \psi, \quad (10)$$

где R – радиус выработки (пластины), м , который меняется по параболическому закону, имеющий вид

$$R = \frac{B^2 \left[1 + \frac{16f^2}{B^2} \left(1 - \frac{2y}{B} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}}}{8f}; \quad (11)$$

f, B – максимальная высота и ширина выработки соответственно, м.

Для анизотропной (армированной) пластины входящие параметры в уравнения (2)-(4), (7)-(10) можно использовать из работы [1], в частности для изотропной, они имеют вид

$$\left. \begin{aligned} B_{11} = B_{22} = \frac{E}{\Delta}; \quad B_{12} = \frac{\nu E}{\Delta}; \quad B_{66} = G; \quad B_{16} = B_{26} = 0; \\ a_{44} = a_{55} = \frac{1}{G}; \quad D_{11} = D_{22} = \frac{Eh^3}{12\Delta}; \quad D_{12} = \nu D_{11}; \quad D_{12}^* = G \frac{h^3}{12}, \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

где E – модуль упругости, МПа;

ν – коэффициент Пуассона;

$\Delta = 1 - \nu^2$;

G – модуль сдвига, МПа; $G = E/2(1 + \nu)$.

Вариация полной энергии деформированной пластины, состоящая из вариации потенциальной энергии пластины и потенциала внешних сил соответственно в состоянии равновесия, равна нулю:

$$\delta \mathcal{E} = \delta U + \delta V = 0. \quad (13)$$

Вариацию потенциальной энергии внешних сил запишем в виде

$$\delta V = -\delta \iint q_z w \, ds. \quad (14)$$

Интегралы в этом выражении вычисляются в пределах

$$0 \leq x \leq R; \quad 0 \leq y \leq B; \quad 0 \leq z \leq h; \quad ds = dx dy. \quad (15)$$

Вариация потенциальной энергии оболочки может быть представлена как сумма вариаций энергии деформации изгиба $\delta U_{\text{и}}$ и деформации сдвига $\delta U_{\text{сд}}$:

$$\delta U = \delta U_{\text{и}} + \delta U_{\text{сд}}, \quad (16)$$

где

$$\delta U_{\text{и}} = \iint (M_1 \delta \chi_1 + M_2 \delta \chi_2 + 2M_{12} \delta \tau) ds; \quad (17)$$

$$\delta U_{\text{сд}} = \iint (N_1 \delta \varepsilon_{xz} + N_2 \delta \varepsilon_{yz}) ds. \quad (18)$$

Преобразуем выражение (17) с учетом соотношения (7), а (18) – с учетом соотношения (6). Получим

$$\delta U_{\text{н}} = \frac{1}{2} \delta \iint (D_{11}\chi_1^2 + 2D_{12}\chi_1\chi_2 + D_{22}\chi_2^2 + 4D_{12}^*\tau^2) ds; \quad (19)$$

$$U_{\text{сд}} = \frac{h^3}{48} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) \delta \iint (a_{55}\varphi^2 + a_{44}\psi^2) ds. \quad (20)$$

Учитывая соотношения (19), (20) и заменяя изменения кривизны функциями прогибов w по формулам (5), с учетом зависимостей (3), (4) для вариации полной энергии пластины получим

$$\delta \mathcal{E} = \delta \iint \left[\frac{1}{2} L_1(w) + \frac{h^3}{48} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) L_2(w) + \frac{1}{2} L_3(\Phi) - (q_z)w \right] ds = 0. \quad (21)$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} L_1(w) &= D_{11}(w''_{xx})^2 + 2D_{12}w''_{xx}w''_{yy} + D_{22}(w''_{yy})^2 + 4D_{66}(w''_{xy})^2; \\ L_2(w) &= a_{55}[B_{11}w'''_{xxx} + (B_{12} + 2B_{66})w'''_{xyy}]^2 + \\ &\quad + a_{44}[B_{22}w'''_{yyy} + (B_{12} + 2B_{66})w'''_{xxy}]^2. \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

В отличие от работы [1], будем искать не две, а одну неизвестную функцию $w(x, y)$ в виде

$$w(x, y) = \sum_{j=1}^n a_j f_j(x) g_j(y). \quad (23)$$

Подставим выражения (23) в (21) и приравняем к нулю производные от интеграла по параметрам a_l . Получим алгебраическое уравнение относительно $a_l (l = \overline{1, n})$.

$$\frac{\partial \iint \left[\frac{1}{2} L_1(w) + \frac{h^3}{48} \left(\frac{h^2}{4} - z^2 \right) L_2(w) - (q_z)w \right] ds}{\partial a_l} = 0. \quad (24)$$

Найдем производные по параметрам от каждого слагаемого в (24) в отдельности с учетом (23).

Вводя безразмерные величины и константы по формулам

$$\left. \begin{aligned} x = f\bar{x}; y = B\bar{y}; z = h\bar{z}; t = \frac{f}{B}; s = \frac{h}{B}; w = f\bar{w}; d_{12} = \frac{D_{12}}{D_{11}}; \\ d_{22} = \frac{D_{22}}{D_{11}}; d_{12}^* = \frac{D_{12}^*}{D_{11}}; r_0 = -\frac{q_z}{D_{11}}f^3; h_1 = \frac{h^2}{f^2} - \frac{4s^2z^2}{t^2}; h^* = \frac{h^3h_1a_{55}B_{11}^2}{96D_{11}}; \\ b_1^* = \frac{B_{11}+2B_{66}}{B_{11}}; b_2^* = \frac{B_{22}}{B_{11}}; a^* = \frac{a_{44}}{a_{55}}; a_1^* = \frac{A_{12}}{A_{11}}; a_2^* = \frac{A_{22}}{A_{11}}; a_3^* = \frac{A_{12}^*}{A_{11}} \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

и подставляя выражения (22), (23), (25) в (24), получим алгебраическое уравнение относительно a_i ($i = \overline{1, n}$):

$$\sum_{j=1}^n a_j \iint \sum_{r=1}^{13} F_r G_r ds = r_0 \iint f_l g_l ds, \quad (26)$$

где

$$\left. \begin{aligned} F_1 = f_l'' f_j''; F_2 = f_l'' f_j'; F_3 = f_l f_j''; F_4 = f_l f_j'; F_5 = f_l' f_j'; \\ F_6 = f_l''' f_j''; F_7 = f_l''' f_j'; F_8 = f_l' f_j''; F_9 = f_l' f_j'; F_{10} = f_l f_j'; \\ F_{11} = f_l'' f_j'; F_{12} = f_l f_j''; F_{13} = f_l'' f_j''; \\ G_1 = g_l g_j; G_2 = t^2 d_{12} g_l g_j''; G_3 = t^2 d_{12} g_l'' g_j; G_4 = t^4 d_{22} g_l'' g_j''; \\ G_5 = 4t^2 d_{12}^* g_l' g_j'; G_6 = h^* g_l g_j; G_7 = t^2 h^* b_1 g_l g_j''; \\ G_8 = t^2 h^* b_1 g_l'' g_j; G_9 = t^4 h^* b_1^2 g_l'' g_j''; G_{10} = t^6 h^* b_2^2 a^* g_l''' g_j''; \\ G_{11} = t^4 b_1 b_2 a^* g_l' g_j''; G_{12} = t^4 b_1 b_2 a^* g_l'' g_j'; G_{13} = t^2 h^* b_1^2 a^* g_l' g_j'. \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

При этом безразмерный радиус определяем по зависимости

$$R = R_0 \bar{R}; R_0 = \frac{B}{8t}; \bar{R} = (1 + 16t^2(1 - 2\bar{y})^2)^{\frac{3}{2}}. \quad (28)$$

Подставляя выражение (23) в (8)-(10) и учитывая (28), получим

$$\sigma_x = -\frac{\bar{z}s}{t} \sum_{j=1}^n a_j (B_{11} f_j'' g_j + t^2 B_{12} f_j g_j'') + \frac{8t^2}{\bar{R}} B_{12} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \quad (29)$$

$$\sigma_y = -\frac{\bar{z}s}{t} \sum_{j=1}^n a_j (t^2 B_{22} f_j'' g_j + B_{12} f_j g_j'') + \frac{8t^2}{\bar{R}} B_{22} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \quad (30)$$

$$\tau_{xy} = -2B_{66}s\bar{z} \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'; \quad (31)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{1}{8}h_1 \left(B_{11} \sum_{j=1}^n a_j f_j''' g_j + t^2(B_{12} + 2B_{66}) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' \right); \quad (32)$$

$$\tau_{yz} = -\frac{1}{8}h_1 \left(t^2 B_{22} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' + (B_{12} + 2B_{66}) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j' \right). \quad (33)$$

Координатные функции выберем по методу Бубнова-Галёркина [9], точно удовлетворяющему всем граничным условиям.

Для защемленных и шарнирно закрепленных по контуру краев пластины они имеют соответственно вид

$$f(x) = (x^4 - 2x^3 + x^2)/24; \quad g(y) = (y^4 - 2y^3 + y^2)/24; \quad (34)$$

$$f(x) = (8x^3 - 4x^4 + x)/96; \quad g(y) = (8y^3 - 4y^4 + y)/96. \quad (35)$$

При воздействии установившейся температуры вышеприведенные нормальные напряжения необходимо увеличить на

$$\sigma_{x,y} = \alpha_{(x,y)} E_{(x,y)} \Delta T / (1 - 2\nu_{(x,y)}), \quad \Delta T = T - T_0, \quad (36)$$

где $\alpha_{(x,y)}$ – коэффициент линейного расширения материала, K^{-1} ;

$E_{(x,y)}$, $\nu_{(x,y)}$ – модули упругости, МПа, и коэффициенты Пуассона в двух направлениях;

T , T_0 – температура взрывоустойчивой перемычки и начальная температура в горной выработке, К, соответственно.

При форме перемычки в виде полуокружности выражения (25), (27) примут вид

$$\left. \begin{aligned} x = R\bar{x}; \quad y = 2R\bar{y}; \quad z = h\bar{z}; \quad w = R\bar{w}; \quad d_{12} = \frac{D_{12}}{D_{11}}; \quad d_{22} = \frac{D_{22}}{D_{11}}; \\ d_{12}^* = \frac{D_{12}^*}{D_{11}}; \quad r_0 = -\frac{q_z R^3}{D_{11}}; \quad h_1 = \frac{h^2}{R^2} - 4\bar{z}^2; \quad h^* = \frac{h^3 h_1 a_{55} B_{11}^2}{96 D_{11}}; \\ b_1^* = \frac{B_{11} + 2B_{66}}{B_{11}}; \quad b_2^* = \frac{B_{22}}{B_{11}}; \quad a^* = \frac{a_{44}}{a_{55}}; \quad a_1^* = \frac{A_{12}}{A_{11}}; \quad a_2^* = \frac{A_{22}}{A_{11}}; \quad a_3^* = \frac{A_{12}^*}{A_{11}} \end{aligned} \right\} \quad (37)$$

И

$$\left. \begin{aligned}
 F_1 = f_l'' f_j''; F_2 = f_l'' f_j'; F_3 = f_l f_j''; F_4 = f_l f_j'; F_5 = f_l' f_j'; F_6 = f_l''' f_j''; F_7 = f_l''' f_j'; \\
 F_8 = f_l' f_j''; F_9 = f_l' f_j'; F_{10} = f_l f_j'; F_{11} = f_l'' f_j'; F_{12} = f_l f_j''; F_{13} = f_l'' f_j''; \\
 G_1 = g_l g_j; G_2 = \frac{1}{4} d_{12} g_l g_j''; G_3 = \frac{1}{4} d_{12} g_l'' g_j; G_4 = \frac{1}{16} d_{22} g_l'' g_j''; \\
 G_5 = d_{12}^* g_l' g_j'; G_6 = h^* g_l g_j; G_7 = \frac{1}{4} h^* b_1 g_l g_j''; G_8 = \frac{1}{4} h^* b_1 g_l'' g_j; \\
 G_9 = \frac{1}{16} h^* b_1^2 g_l'' g_j''; G_{10} = \frac{1}{64} h^* b_2^2 a^* g_l''' g_j''; G_{11} = \frac{1}{16} h^* b_1 b_2 a^* g_l' g_j''; \\
 G_{12} = \frac{1}{16} h^* b_1 b_2 a^* g_l''' g_j'; G_{13} = \frac{1}{4} h^* b_1^2 g_l' g_j'.
 \end{aligned} \right\} (38)$$

Интегралы в уравнении (26) вычисляем в пределах $0 \leq \bar{x} \leq 2\sqrt{\bar{y} - \bar{y}^2}$; $0 \leq \bar{y} \leq 1$.

В данном случае уравнения для напряжений примут вид

$$\sigma_x = -\frac{h}{R} \bar{z} \sum_{j=1}^n a_j \left(B_{11} f_j'' g_j + \frac{B_{12}}{4} f_j g_j'' \right) + B_{12} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \quad (39)$$

$$\sigma_y = -\frac{h}{R} \bar{z} \sum_{j=1}^n a_j \left(B_{12} f_j'' g_j + \frac{B_{22}}{4} f_j g_j'' \right) + B_{22} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j; \quad (40)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{h}{R} \bar{z} B_{66} \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'; \quad -\frac{1}{2} \leq \bar{z} \leq \frac{1}{2}; \quad (41)$$

$$\tau_{xz} = -\frac{1}{8} h_1 \left(B_{11} \sum_{j=1}^n a_j f_j''' g_j + \frac{1}{4} (B_{12} + 2B_{66}) \sum_{j=1}^n a_j f_j' g_j'' \right); \quad (42)$$

$$\tau_{yz} = -\frac{1}{16} h_1 \left(\frac{1}{4} B_{22} \sum_{j=1}^n a_j f_j g_j''' + (B_{12} + 2B_{66}) \sum_{j=1}^n a_j f_j'' g_j' \right); \quad (43)$$

Следовательно, в отличие от работ [1, 4, 5] в данном случае общие напряжения, возникающие в перемычке, состоят из напряжений при действии на нее горного давления, полученные ранее [7], и приведенных выше – от

ударной волны и температуры при двух видах граничных условий. При этом решение задачи упрощается в связи с тем, что не учитывается влияние на напряженно-деформированное состояние перемычки проемных металлических труб и используются две неизвестные функции вместо трех.

Выводы и рекомендации

1. Разработанная математическая модель напряженно-деформированного состояния перемычки под действием ударной волны, а также температуры, учитывающая геометрические параметры, механические характеристики применяемых материалов, различные условия крепления, глубину возведения, которая вместе с ранее разработанной (при действии горного давления) позволит определить параметры, обеспечивающие ее прочность и устойчивость в результате ликвидации пожаров и при взрывах в горных выработках угольных шахт.

2. В дальнейшем необходимо провести моделирование напряженно-деформированного состояния перемычки, определить возникающие в ней максимальные напряжения, сравнить с допускаемыми их значениями и разработать номограмму для оперативного определения основной ее технической характеристики – толщины в зависимости от вышеприведенных параметров и условий эксплуатации.

Список литературы / References

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

Ageyev, V.G. *Vzryvozashchita pri izolatsii pozharov v ugol'nykh shzhkhtakh* [Explosion protection by insulation of fires in coal mines]. Donetsk, Arpi Publ., 2014, 338 p.

2. Каледин, Н.В. Современные материалы для возведения гидромеханическим способом изолирующих сооружений в шахте / Н.В. Каледин, Г.И. Пейтибай, Э.Г. Чайковская // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2009. – Вып. 46. – С. 42 – 50.

Kaledin, N.V., Peftibay, G.I., Chaykovskaya, E.G. *Sovremennyye materialy dlya vozvedeniya gidromekhanicheskim sposobom izoliruyushchikh sooruzheniy v shakhte* [Modern materials for erection of isolation installations in the mine by the hydromechanical method]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2009, issue 46, pp. 42 – 50.

3. Пейтибай, Г.И. Применение современных материалов для возведения изолирующих взрывоустойчивых сооружений / Г.И. Пейтибай, Э.Г. Чайковская, А.М. Луганский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2010. – Вып. 47. – С. 25 – 34.

Peftibay, G.I., Chaykovskaya, E.G., Luganskiy, A.M. *Primeneniye sovremennykh materialov dlya vozvedeniya izoliruyushchikh vzryvoustoychivyykh*

sooruzheniy [Use of modern materials for erection of isolating explosion-stable structures]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2010, issue 47, pp. 25 – 34.

4. Агеев, В.Г. Математическое моделирование напряженного состояния шахтной взрывоустойчивой перемычки / В.Г. Агеев, И.Ф. Марийчук // *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza Safety & Fire Technique*. – 2013. – Vol. 31, № 3. – P. 33 – 39.

Ageyev, V.G., Mariychuk, I.F. *Matematicheskoye modelirovaniye napryazhyennogo sostoyaniya shakhtnoy vzryvoustoychivoy peremychki* [The mathematical modeling of the stressed state of the mine explosion-stable stopping]. *Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza Safety & Fire Technique*. 2013, vol. 31, no. 3, pp. 33 – 39.

5. Агеев, В.Г. Параметры шахтной взрывоустойчивой перемычки / В.Г. Агеев, И.Ф. Марийчук // *Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор»*. – Донецк, 2014. – Вып. 51. – С.16 – 24.

Ageyev, V.G., Mariychuk, I.F. *Parametry shakhtnoy vzryvoustoychivoy peremychki* [Parameters of the mine explosion-stable stopping]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2014, issue 51, pp. 16 – 24.

6. Ледяйкин, Е.С. О нагревании изоляционных взрывоустойчивых перемычек / Е.С. Ледяйкин, Н.Ю. Трошков, А.С. Ярош // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности*. – 2016. – № 4. – С. 56 – 61.

Ledyaykin, Ye.S., Troshkov, N.Yu., Yarosh, A.S. *O nagrevanii izolatsionnykh vzryvoustoychivyykh peremychek* [On heating the isolation explosion-stable stoppings]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugol'noy promyshlennosti* [Bulletin of the Scientific Centre on safety of works in the coal industry], 2016, no. 4, pp. 56 – 61.

7. Агеев, В.Г. Математическая модель напряженно-деформированного состояния взрывоустойчивой перемычки под действием горного давления без учета действия воздушной ударной волны / В.Г. Агеев, Г.И. Пейтибай // *Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли*. – Кемерово, 2017. – № 4. – С. 68 – 74.

Ageyev, V.G., Peftibay, G.I. *Matematicheskaya model' napryazhyenno-deformirovannogo sostoyaniya vzryvoustoychivoy peremychki pod deystviyem gornogo davleniya bez uchyeta deystviya vozdushnoy udarnoy volny* [The mathematical model of the deflected mode of the explosion-stable stopping under the influence of the underground pressure nonregistering the effect of the air shock wave]. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoy i ekologicheskoy bezopasnosti v gornoy otrasli* [Bulletin of the Scientific Centre of the VostNII on industrial and environmental safety in mining sector], Kemerovo, 2017, no. 4, pp. 68 – 74.

8. Агеев, В.Г. Моделирование воздействия горного давления на взрывоустойчивую перемычку / В.Г. Агеев, Г.И. Пейтибай, И.Ф. Марийчук // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2018. – № 2 (55). – С. 44 – 52.

Ageyev, V.G., Peftibay, G.I. Mariychuk, I.F. *Modelirovaniye vozdeystviya gornogo davleniya na vzryvoustoychivuyu peremychku* [Modeling the influence of the underground pressure on the explosion-stable stopping]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. Donetsk, 2018, no. 2 (55), pp. 44 – 52.

9. Методы решений краевых задач в горной геомеханике / И.А. Ефремов, С.Н. Александров, И.Ф. Марийчук, С.В. Подкопаев и др.– Донецк: Ноулидж, 2013. – 291 с.

Yefremov, I.A., Aleksandrov, S.N., Mariychuk, I.F., Podkopayev, S.V. etc. *Metody resheniya krayevykh zadach v gornoy geomekhanike* [Methods of solving the boundary problems in the mining geomechanics]. Donetsk, Knowledge Publ., 2013, 291 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 17.01.2018

*Vladimir Grigoryevich Ageyev, Dr. Sci. (Tech.), director; e-mail: niigd@mail.ru;
Georgy Ivanovich Peftibay, head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-36*

THE DYNAMIC DEFLECTED MODE OF AN EXPLOSION-STABLE STOPPING UNDER INFLUENCE OF SHOCK WAVES

Purpose. To work out the mathematical model of the explosion-stable stopping under the influence of the shock waves and temperature in the coal mine workings taking into account the stationary or jointed fastening to determine its parameters securing the safe operation of mine rescuers by localization of methane, coal dust explosions and fires.

Methods. Theoretical method of investigations with the use of fundamental laws of the theory of anisotropic plates and of variation method of solving the boundary problems in the mechanics.

Results. The equations to determine the tensions arising in the stopping depending on its geometrical parameters, mechanical characteristics of a material, operational load and temperature, fastening conditions have been obtained.

Scientific novelty. The design diagram of the explosion-stable stopping in the form of the plate with a radius changing by the parabolic law, with clamped or simply supported borders under the of the shock wave or temperature load, in which the lateral shear deformations change by the square law, is accepted for the first time.

Practical value. The adduced and worked out earlier mathematical models of the deflected mode of the explosion-stable stopping under the influence of the shock wave, temperature and underground pressure will allow determining the parameters ensuring the strength of the stopping, stability and safety of the mine rescuers when accidents elimination in the coal mine workings.

Key words: mine working; shock wave; explosion-stable stopping; load; temperature; variation method; tensions; parameters.

УДК 614.843.8

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

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-02*

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ УСЛОВИЯ УСТОЙЧИВОГО ПЕНООБРАЗОВАНИЯ НА СЕТКАХ

Цель – определение условий формирования пены при различных температурах ее составляющих в газовой и жидкой фазах.

Методика. Аналитические и экспериментальные исследования процессов генерирования газо- и воздушно-механической пены на сетках при различных температурах газа и жидкости.

Результаты. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования условий образования на сетках газо- и воздушно-механической пены позволили установить температурные пределы для устойчивого пенообразования на сетках. Установлена взаимосвязь между кратностью пены и температурой газовой фазы.

Научная новизна. Обоснованы температурные пределы устойчивого пенообразования на сетках газо- и воздушно-механической пены.

Практическая значимость. Предложено при проектировании противопожарной защиты с использованием эжекционных генераторов газо- и воздушно-механической пены усиливать возможные температурные условия пенообразования на сетках.

Ключевые слова: *газо- и воздушно-механическая пена; пенообразование на сетках; температурные пределы газов для устойчивого пеногенерирования.*

Постановка задачи. Во многих экономически развитых странах газомеханические пены на основе воздуха, азота, парогазовых смесей, продуктов термодеструкции твердых горючих веществ находят довольно широкое применение для тушения пожаров в зданиях, сооружениях, жилом секторе, промышленных объектах поверхностного и подземного базирования. Это различные туннели, шахтные подземные выработки и другое.

В угольных шахтах для профилактики и тушения эндогенных пожаров применяют воздушно-механическую пену, а также инертную пену на основе азота и других инертных газов [1].

Все более широкое применение находят воздушно-механические пены для тушения горючих и легковоспламеняющихся жидкостей: моторного топлива [2], нефти и нефтепродуктов [3].

К настоящему времени подробно исследованы различные пенообразующие вещества для получения воздушно-механической пены. Определены составы, свойства и область применения этих пен для тушения пожаров [4, 5].

Температура газов и пенообразующей жидкости существенно влияет на процесс генерирования пены на сетках.

Анализ последних исследований. Изучив литературные источники [1–7], можно сделать вывод, что определение температурных пределов жизнедеятельности пены – актуальная задача.

Выделение не решенных ранее частей общей проблемы. Для более эффективного применения пены в процессе тушения пожаров нужно учитывать температурные пределы газовой и жидкой фаз, образующих пену. От этого зависит устойчивость пены, другими словами время ее жизни. Эта задача ранее не была решена.

Цель статьи – определить условия формирования пены при различных температурах ее составляющих в газовой и жидкой фазах.

Результаты исследований. Процесс пенообразования на сетках будет устойчивым в том случае, когда пленка из пенообразующего раствора остается жидкой до момента отрыва пузырька от сетки.

Кинетику теплообмена между двумя граничными фазами при отсутствии испарения (массообмена) можно описать системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{c_{\Gamma} dT_{\Gamma}}{d\tau} = -\alpha(T_{\Gamma} - T_{\text{ж}})S; \\ \frac{c_{\text{ж}} dT_{\text{ж}}}{d\tau} = -\alpha(T_{\Gamma} - T_{\text{ж}})S, \end{cases} \quad (1)$$

где c_{Γ} , $c_{\text{ж}}$ – теплоемкость газа и жидкости, Дж/К;
 T_{Γ} , $T_{\text{ж}}$ – температура газа и жидкости, К;
 α – коэффициент теплопередачи, Дж/(К·м²·с);
 S – площадь поверхности раздела фаз, м²;
 τ – время, с.

Сложив уравнения (1), получим

$$\frac{d}{d\tau} (c_{\Gamma} T_{\Gamma} + c_{\text{ж}} T_{\text{ж}}) = 0,$$

откуда

$$c_{\Gamma} T_{\Gamma} + c_{\text{ж}} T_{\text{ж}} = \text{const} = c_{\Gamma} T_{\Gamma_0} + c_{\text{ж}} T_{\text{ж}_0}, \quad (2)$$

где индексом «0» отмечены начальные значения температуры.

С помощью равенства (2) система уравнений (1) сводится к одному уравнению

$$\frac{d}{d\tau} = -\beta(T_{\Gamma} - \theta), \quad (3)$$

интегрирование которого дает

$$T_{\Gamma} = \theta + \frac{1}{1+\eta} (T_{\Gamma_0} - T_{\text{ж}_0}) e^{-\gamma(\tau)}; \quad (4)$$

$$T_{\text{ж}} = \theta - \frac{\eta}{1+\eta} (T_{\Gamma_0} - T_{\text{ж}_0}) e^{-\gamma(\tau)}; \quad (5)$$

$$\theta = \frac{\eta(T_{\Gamma_0} + T_{\text{ж}_0})}{1+\eta}; \quad (6)$$

$$\beta(\tau) = \frac{\alpha S(\tau)}{c_{\Gamma}} (1 + \eta) = \frac{\alpha S(\tau)}{c_{\Gamma}} \left(1 + \frac{1}{\eta}\right); \quad (7)$$

$$\eta = \frac{c_{\Gamma}}{c_{\text{ж}}} = \frac{c_{\Gamma_0} \rho_{\Gamma} V_{\Gamma}}{c_{\text{ж}_0} \rho_{\text{ж}} V_{\text{ж}}} = \frac{c_{\Gamma_0} \rho_{\Gamma}}{c_{\text{ж}_0} \rho_{\text{ж}}} (K - 1); \quad (8)$$

$$\gamma(\tau) = \int_0^{\tau} \beta(\tau) d\tau, \quad (9)$$

где $c_{\Gamma_0}, c_{\text{ж}_0}$ – удельные теплоемкости газа и жидкости при нормальных условиях, Дж/(К·кг);

$\rho_{\Gamma}, \rho_{\text{ж}}$ – плотность газа и жидкости, кг/м³;

$V_{\Gamma}, V_{\text{ж}}$ – объемы газа и жидкости, м³;

K – кратность двухфазной среды; $K = \frac{V_{\Gamma} + V_{\text{ж}}}{V_{\text{ж}}}$.

Предположим, что временная зависимость величины β определяется соответствующей функциональной зависимостью поверхности раздела $c_{\Gamma_0}(\tau)$, которая в процессе пенообразования изменяется от поверхности капли S_0 до поверхности пузырька $S_{\text{п}}$. При этом следует различать временные интервалы: время полета капли жидкости от форсунки до сетки τ_0 , и, наконец, интервал времени $\tau > \tau_1 + \tau_0$, когда пузырек отрывается от сетки и является уже элементом пены. Таким образом, можно полагать, что $S(\tau)$ является ступенчатой функцией вида

$$S(\tau) = \begin{cases} \frac{\alpha}{c_{\Gamma}}, & \tau < \tau_0; \\ \frac{S_{\text{п}} - S_0}{\tau_0} \tau, & \tau_1 < \tau < \tau_1 + \tau_0; \\ S_{\text{п}}, & \tau > \tau_1 + \tau_0. \end{cases} \quad (10)$$

Тогда формула (9) примет вид

$$\gamma(\tau) = \begin{cases} \frac{\alpha}{c_{\Gamma}} (1 + \eta) S_0 \tau_0, & \tau_0 < \tau; \\ \frac{\alpha}{c_{\Gamma}} (1 + \eta) \left[S_0 \tau_0 + \frac{(S_{\text{п}} - S_0)}{2} \tau (\tau^2 - \tau_1^2) \right], & \tau_1 < \tau < \tau_1 + \tau_0; \\ \frac{\alpha}{c_{\Gamma}} (1 + \eta) \left[S_{\text{п}} \tau_1 - \frac{(S_{\text{п}} + S_0)}{2} \tau \right], & \tau > \tau_1 + \tau_0. \end{cases} \quad (11)$$

Функция $\gamma(\tau)$ достаточно быстро растет с течением времени. Как видно из выражений (4) и (5), равновесное значение температур газа и жидкости в пене при $\tau \rightarrow \infty$ равно θ .

Оценим прежде всего, при каких начальных значениях температуры газа пена будет замерзать, т.е. $\theta = 273$ К. Используя формулу (6) и полагая в ней $\theta = 274$ К, получим

$$T_0 = \left[274 + \frac{274 - T_{ж0}}{\eta} \right]. \quad (12)$$

Согласно справочным данным [6], коэффициент η для азота и воздуха равен

$$\eta = 3,1 \cdot 10^{-4}(K - 1). \quad (13)$$

Результаты вычислений по формулам (12) и (13) при начальной температуре воды 277 К показывают, что пена кратностью 500 не будет замерзать при температуре воздуха до минус 254 К, кратностью 1000 – до минус 264 К.

Оценим далее начальную температуру газа, при которой не будет происходить замерзание пузырька до момента отрыва его от сетки, т.е. до $\tau = \tau_1 + \tau_0$. Из выражения (5) находим, что при $T = 274$ К

$$T_{r0} = \left[\frac{274}{1 - e^{-\gamma_0}} + \frac{274 - T_{ж0}(1 + \eta e^{-\gamma_0})}{\eta(1 - e^{-\gamma_0})} \right], \quad (14)$$

где $\gamma_0 = \gamma(\tau_1 + \tau_0)$.

Если жидкость равномерно орошает всю поверхность сетки S_c , то формирование пузырька происходит за время между двумя последними попаданиями капель на одно и то же место на сетке. Предположим, что ячейка сетки квадратная с линейным размером l_1 и что выдувается пузырек, имеющий форму правильного многогранника. В таком случае можно показать, что

$$\gamma_0 = \left(\frac{4}{3} \frac{r}{l_1} \right)^{\frac{2}{3}} - \frac{\varepsilon S_c l_1}{c_{r0} \rho q_{ж} K^{\frac{1}{3}}} (1 + \eta) \left(1 + \frac{3l S_{\phi}}{2r S_{\phi}} \right), \quad (15)$$

где r – средний радиус капли, м;

$q_{ж}$ – расход жидкости, м³/с;

S_{ϕ} – общая площадь выходных отверстий форсунок, м²;

l – расстояние между форсунками и сеткой, м;

ε – геометрический коэффициент формы пузырька пены.

Для сферы $\varepsilon = \sqrt[3]{36\pi} \approx 4,8$; для правильных многогранников $\varepsilon > 4,8$.

Для оценки значения коэффициента теплообмена воспользуемся моделью приведенного слоя [8], согласно которому

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{ср}}}{\delta},$$

где α – коэффициент теплообмена, Дж/(м²·с·К);

$\lambda_{\text{ср}}$ – средний коэффициент теплопроводности приведенного слоя, Дж/(м·с·К);

δ – толщина этого слоя, м.

На границе газ–жидкость наиболее подвижной является газовая фаза, поэтому $\lambda_{\text{ср}} \cong \lambda_{\text{г}}$, а величина $\delta \approx (3 - 5)\delta_0$, где δ_0 – длина свободного пробега молекул газа. Таким образом, на граничной поверхности азот–жидкость

$$\alpha = \frac{\lambda_{\text{аз}}}{4\delta_{\text{с0}}} \approx 10^5 \text{ Дж/(м}^2\cdot\text{с}\cdot\text{К)}.$$

Полагая $c_{\text{г0}}\rho_{\text{г}} = 1,25 \cdot 10^3 \text{ Дж/(м}^2\cdot\text{К)}$; $q_{\text{ж}} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$; $\varepsilon = 5$; $S_{\text{с}} = 0,1 \text{ м}^2$;
 $r = \frac{3}{4}l_1$,

находим, что

$$\gamma_0 = 10^4 \text{ К}^{-\frac{1}{2}} \gg 1,$$

в связи с чем $e^{-\gamma_0} \approx 0$ и формула (14) практически совпадает с формулой (12). Результаты расчетов по формуле (12) остаются в силе и для оценки устойчивости процесса пенообразования.

При получении инертной пены с использованием жидкого азота, который подается непосредственно в трубопровод с потоком раствора пенообразователя, необходимо определить соотношение между расходами раствора пенообразователя и жидкого азота, при котором не будет замерзания трубопровода. Это условие находится из уравнения теплового баланса

$$c_{\text{ж}}\rho_{\text{ж}}(T_{\text{ж}} - \theta_{\text{п}})q_{\text{ж}} = W\rho_{\text{а}}q_{\text{а}} + c_{\text{г}}\rho_{\text{г}}Nq_{\text{а}}(\theta_{\text{п}} - T_{\text{г}}), \quad (16)$$

где $\rho_{\text{ж}}$, $\rho_{\text{г}}$, $\rho_{\text{а}}$ – плотности раствора пенообразователя, газа и жидкого азота, кг/м³;

$q_{\text{ж}}$, $q_{\text{а}}$ – расходы раствора пенообразователя и жидкого азота, м³/с;

$c_{\text{ж}}$, $c_{\text{г}}$ – удельные теплоемкости жидкости и газа, Дж/(кг·К);

$T_{\text{ж}}$, $T_{\text{г}}$ – начальные температуры жидкости и газа, К;

$\theta_{\text{п}}$ – температура пены, К;

W – удельная теплота парообразования, Дж/кг;

N – число, показывающее относительное увеличение объема при фазовом переходе жидкость–газ (для температуры газа около 273 К $N = 715$).

Из этого условия, используя соответствующие численные значения ($\rho_a = 850 \text{ кг/м}^3$; $T_r = 77 \text{ К}$; $W_a = 2,05 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$; $c_r = 1040 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $\rho_{ж} = 1000 \text{ кг/м}^3$; $c_{ж} = 4190 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$), находим, что пена не замерзает, если расход водного раствора пенообразователя и жидкого азота подчиняется неравенству

$$q_a < q_{ж} T_{ж} / 81,5. \quad (17)$$

Эксперименты подтвердили достоверность неравенства (17).

Рассмотрим, наконец, при каких значениях температуры газа не будет происходить закипание пленки. Поскольку $\gamma_0 \gg 1$, то можно использовать выражение (6), полагая в нем $\theta = 372 \text{ К}$. Тогда

$$T_0 = 372 + \frac{372 + T_{ж0}}{\eta}. \quad (18)$$

Результаты вычислений по формулам (13) и (18) показывают, что устойчивый процесс пенообразования на сетках должен наблюдаться при температуре 900 К для пены кратностью 500, что подтверждают эксперименты, проведенные в НИИГД «Респиратор» [1]. Поэтому можно считать, что срыв пенообразования на сетках в пеногенераторе, в котором в качестве газовой фазы используют продукты горения или парогазовую смесь, по-видимому, объясняется влиянием на процесс самих продуктов горения, и в меньшей степени их температуры.

Многие газы, такие, как аммиак, диоксид серы, диоксид углерода и другие, вступая в контакт с поверхностью воды и адсорбируясь ею, химически реагируют с водой. При этом образуются соединения, диссоциирующие на ионы. Сначала происходит адсорбция газа поверхностью воды, затем идет химическая реакция, далее образующееся новое вещество диссоциирует на ионы. Если в продуктах горения выделить только диоксид углерода (CO_2), то адсорбируясь в воде, выделяется угольная кислота, которая является активным пеногасителем, не рассматривая даже различного типа углеводороды и твердые включения в продуктах термодеструкции твердых горючих веществ. И все же температура продуктов горения является катализатором адсорбционных процессов, ухудшающим процесс пенообразования.

Исследования влияния продуктов горения на процесс пенообразования проводили на экспериментальной установке (рис. 1). За критерий качества пенообразования была принята кратность пены, которая определяет производительность пеногенератора. При этом проводили измерения температуры продуктов горения, эжектируемых пеногенератором, и пены, кратности пены и кислотности раствора пенообразователя после синерезиса его из пены по pH среды. Кратность пены регулировалась расходом раствора пенообразователя, подаваемого в распылитель пеногенератора, и была равна 20, 80 и 130. Максимальная температура продуктов горения 590 К.

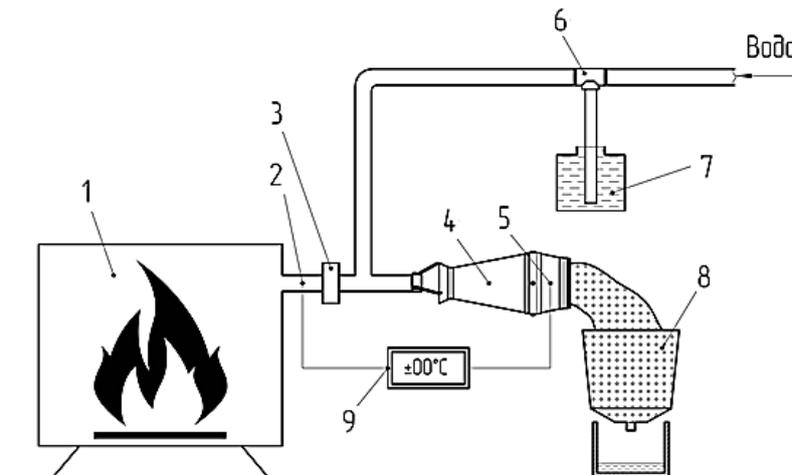


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования влияния продуктов горения на процесс пеногенерирования:

1 – печь для сжигания твердых горючих веществ; 2, 5 – термопары, 3 – вентилятор; 4 – пеногенератор; 6 – пеносмеситель; 7 – емкость с пенообразователем; 8 – прибор для определения кратности пены; 9 – милливольтметр

Данные экспериментальных исследований представлены на графике (рис. 2).

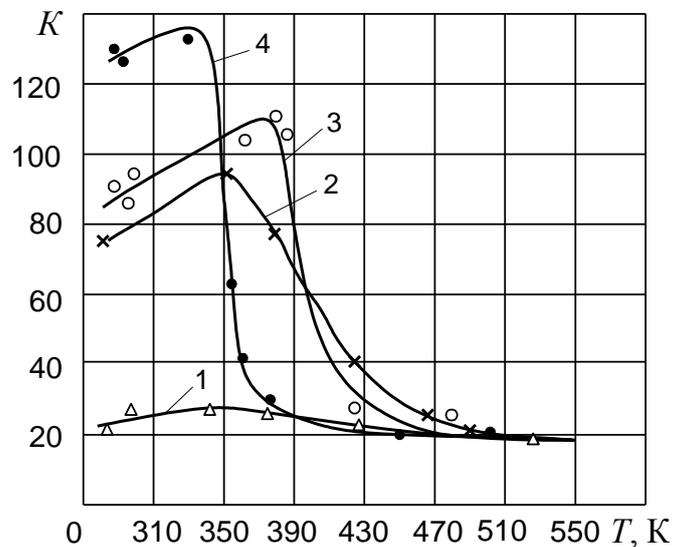


Рис. 2. Зависимость кратности пены от температуры эжектируемых пеногенератором продуктов горения:

1 – $K = 24$; 2 – $K = 70$; 3 – $K = 90$; 4 – $K = 130$

Как показали эксперименты, с увеличением температуры продуктов горения, эжектируемых пеногенератором, кратность пены резко падает. Причем этот процесс интенсифицируется с увеличением кратности пены, полученной при нормальных условиях. Так, при кратности, равной 20, уменьшение ее происходит более плавно, чем при кратности 130. Как видно на графике,

уменьшение кратности происходит в 4...6 раз. При этом замечено даже некоторое увеличение ее в пределах температуры 310...350 К.

Таким образом, с увеличением температуры продуктов горения ухудшается процесс пенообразования, что влечет за собой снижение кратности, а следовательно, и производительности пеногенератора. Отбор проб газа перед пеногенератором и находящегося в пене показал, что около 50 % углекислого газа адсорбируется в водный раствор пенообразователя, в результате чего образуется угольная кислота H_2CO_3 , о чем свидетельствует увеличение кислотности раствора $pH = 4$.

Выводы. При проектировании установок пенной пожарной защиты необходимо использовать температурные датчики, выключающие установку при температуре продуктов горения выше 330 К (ниже значения, при котором происходит резкое падение кратности пены). Эжекционные пеногенераторы, используемые в стационарных пожарных установках, должны иметь производительность выше расчетной, чтобы компенсировать потери пены в результате влияния продуктов горения.

Список литературы / References

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

Pashkovskiy, P.S. *Endogennyye pozhary v ugol'nykh shakhtach* [Spontaneous fires in coal mines]. Donetsk, Knowledge Publ., 2013, 792 p.

2. Тушение пожаров моторного топлива Европейского стандарта низкократной пеной / С.С. Воевода, С.А. Макаров, В.П. Молчанов, Д.Л. Бастриков, М.А. Крутов // Пожаровзрывобезопасность. – 2011. – № 4, т. 20. – С. 49 – 53.

Voyevoda, S.S., Makarov, S.A., Molchanov, V.P., Bastrikov, D.L., Krutov, M.A. *Tusheniye pozharov motornogo topliva Yevropeyskogo standarta nizkokratnoy penoy* [Extinguishing the fires of a European standard motor fuel with the low-expansion foam]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2011, vol. 20, no. 4, pp. 49 – 53.

3. Тушение пожаров нефти и нефтепродуктов / А.Ф. Шароварников, В.П. Молчанов, С.С. Воевода, С.А. Шароварников. – М.: Калан, 2002. – 448 с.

Sharovarnikov, A.F., Molchanov, V.P., Voyevoda, S.A., Sharovarnikov, S.A. *Tusheniye pozharov nefi i nefteproduktov* [Extinguishing the oil and petrochemical products fires]. Moscow, Kalan Publ., 2002, 448 p.

4. Шароварников, А.Ф. Пенообразователи и пены для тушения пожаров. Состав. Свойства. Применение / А.Ф. Шароварников, С.А. Шароварников // Пожаротушение: сб. науч. тр. / ВНИИПО. – М., 2005. – 334 с.

Sharovarnikov, A.F., Sharovarnikov, S.A. *Penoobrazovateli i peny dlya tusheniya pozharov. Sostav. Svoystva. Primeneniye* [Foaming agents and foams for extinguishing the fires. Composition. Properties. Application]. *Pozharotusheniye:*

sb. nauch. tr. [Fire extinguishing: collected scientific papers]. Moscow, VNIPO Publ., 2005, 334 p.

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

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

6. Шароварников, А.Ф. Анализ основных соотношений в теории тушения пожаров пенами / А.Ф. Шароварников, Г.С. Теплов // Пожарная техника и тушение пожаров: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1990. – С. 111 – 120.

Sharovarnikov, A.F., Teplov, G.S. *Analiz osnovnykh sootnosheniy v teorii tusheniya pozharov penami* [Analysis of basic relations in the theory of extinguishing the fires with foams]. *Pozharnaya tekhnika i tusheniye pozharov: sb. nauch. tr.* [Fire engineering and fire extinguishing: collected scientific papers]. Moscow, VNIPO Publ., 1990, pp. 111 – 120.

7. Франк-Каменецкий, Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий. – М.: Интеллект, 2008. – 408 с.

Frank-Kamenetskiy, D.A. *Osnovy makrokinetiki. Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoy kinetike* [Fundamentals of macrokinetics. Diffusion and heat transfer in the chemical kinetics]. Moscow, Intellect Publ., 2008, 408 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 28.03.2018

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

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-02

TEMPERATURE CONDITIONS OF THE STEADY FOAMING ON NETS

Purpose. Detection of conditions of foam formation at various temperatures of the gas and liquid phases of its components.

Methods. Analytical and experimental investigations of the processes of generation of the gas- and air-mechanical foam on the nets at various gas and liquid temperatures.

Results. The theoretical and experimental investigations of the conditions of formation of the gas- and air-mechanical foam on the nets carried out allowed establishing the temperature limits for the steady foaming on the nets. The interconnection between the foam expansion ratio and temperature of the gas phase has been established.

Scientific novelty. The temperature limits of the steady foaming of the gas- and air-mechanical foam on the nets have been substantiated.

Practical value. It is proposed to intensify the possible temperature conditions of the foaming on the nets by projecting the fire protection with the use of gas and air-mechanical foam ejection generators.

Key words: *gas- and air-mechanical foam; foaming on the nets; temperature limits of gases for steady foam generation.*

УДК 614.841.22:001.891.572

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

Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: zinstar@mail.ru;

Кристина Валериевна Глушенко, мл. науч. сотр.; e-mail: kristina.hlushenko@mail.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81

ТЕПЛОВАЯ ДЕПРЕССИЯ ПРИ САМОНАГРЕВАНИИ СКОПЛЕНИЯ ЗЕРНА

Цель. Разработать математическую модель движения воздуха в порах зерновой массы и установить аналитические зависимости скорости ламинарного, турбулентного и смешанного движения воздуха в межзерновом пространстве от температуры.

Методика. Применение квадратичного закона сопротивления и уравнения состояния идеального газа при математическом описании движения потока воздуха.

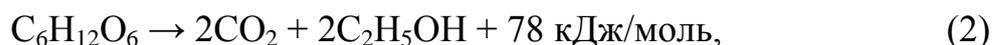
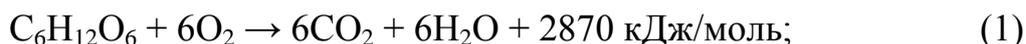
Результаты. Показано, что образование очага повышенной тепловой активности внутри скопления зерна приводит к возникновению тепловой депрессии за счёт разности плотностей воздуха и как следствие движению воздуха снизу вверх в газовой фазе межзернового пространства. При математическом описании фильтрационного потока воздуха внутри скопления установлено, что скорость растёт до определённого значения температуры, соответствующей пожароопасной скорости потока.

Научная новизна. Впервые предложены аналитические зависимости скоростей ламинарного, турбулентного и смешанного движения воздуха от проницаемости среды и средней температуры потока по толщине скопления.

Практическая значимость. Полученные результаты можно применять для прогнозирования пожароопасной ситуации в хранилище с зерновой массой.

Ключевые слова: зерно; проницаемость; очаг самонагревания; тепловая депрессия; фильтрационный поток; ламинарный режим; турбулентный режим.

Постановка проблемы. Известно, что естественная тяга образуется в вертикальных силосах и хранилищах сельскохозяйственных культур вследствие разности плотностей воздуха межзернового пространства. На плотность воздуха и, следовательно, на значение естественной тяги оказывают влияние температура, химический состав и влажность воздуха. Поскольку при хранении зерна возможно протекание аэробного и анаэробного «дыхания» – окисления глюкозы растительной клетки в присутствии (1) и отсутствии (2) кислорода [1]



сопровождающегося изменением состава воздуха межзернового пространства, выделением теплоты в зерновой массе и образованием более тяжёлого по сравнению с другими содержащимися в воздухе газами диоксида углерода,

то в хранилище с зерном возникают благоприятные условия для появления естественной тяги. Разность давлений, обусловленная экзотермическим процессом «дыхания», называется тепловой депрессией h , Па/м.

Значительное количество работ посвящено исследованию естественной тяги при проветривании рудников горных выработок, при движении воздуха в системе вентиляции зданий, в дымовых трубах и др. Однако изучению формирования тепловой депрессии при движении тёплого воздуха от очага самонагревания к более холодным слоям в скоплении сельскохозяйственных культур не уделялось достаточно внимания [2]. Поэтому представляет интерес определение тепловой депрессии и скорости движения воздуха в порах зерновой массы при самонагревании.

Анализ последних исследований и публикаций. В скоплении зерновой массы под действием тепловой депрессии возможно два режима движения воздуха – ламинарный и турбулентный. Ламинарный режим характеризуется упорядоченным движением воздуха преимущественно по параллельным траекториям. Перемешивание в потоке происходит в результате взаимопроникновения молекул. При турбулентном режиме движение воздуха хаотично, перемешивание обусловлено взаимопроникновением отдельных объёмов воздуха и поэтому оно происходит значительно интенсивнее, чем при ламинарном режиме. Турбулентность является следствием внешних (вовлекаемых потоком) или внутренних (генерируемых в потоке) возмущений. Турбулентность в скоплении зерновой массы, как правило, внутреннего происхождения. Её причина – вихреобразования при обтекании потоком неровностей пор.

Установленный опытным путём основной закон ламинарной фильтрации (закон Дарси), описывающий движение газа или жидкости в пористой среде (зерновой массе), выражается формулой

$$v = k_{\text{Л}} \frac{\Delta P}{\rho_{\text{В}} L g} = k_{\text{Л}} I, \quad (3)$$

где v – скорость фильтрационного потока, м/с;

$k_{\text{Л}} = \frac{k_{\text{ф}} g}{v}$ – коэффициент ламинарной фильтрации, м/с;

$k_{\text{ф}}$ – коэффициент проницаемости пористой среды, м²;

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

$\nu = \mu / \rho_{\text{В}}$ – кинематическая вязкость воздуха, равная $1,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с;

μ – динамическая вязкость воздуха, равная $1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с;

$\rho_{\text{В}}$ – плотность воздуха, заполняющего межзерновое пространство, равная 1,3 кг/м³;

ΔP – перепад давлений, Па;

L – толщина скопления в направлении фильтрации, м;

$$I = \frac{\Delta P}{\rho_B L g} - \text{гидравлический уклон.}$$

Таким образом, скорость фильтрации прямо пропорциональна гидравлическому уклону.

Для определения коэффициента ламинарной фильтрации предложены эмпирические формулы. В частности, для пористых сред органического происхождения применяют формулу Газена [3]

$$k_{\text{Л}} = \frac{c d_z^2 g}{\nu}, \quad (4)$$

где c – безразмерный коэффициент, зависящий от пористости среды:

$c = 8,5 \cdot 10^{-4}$ – для очень плотных пористых сред;

$c = 16 \cdot 10^{-4}$ – для насыпей средней плотности из частиц различной формы;

$c = 21 \cdot 10^{-4}$ – для насыпей средней плотности из шарообразных частиц;

d_z – эквивалентный диаметр зернистой частицы пористой среды, м.

С увеличением эквивалентного диаметра зернистых частиц и повышением скорости наступает переход от ламинарной фильтрации к турбулентной. Начало этого перехода определяется критическим значением числа Рейнольдса $Re_{\text{кр}}$, характеризующего фильтрационное движение. По данным Н.Н. Павловского [3],

$$Re = \frac{\nu d_z}{\nu} \frac{1}{0,75m + 0,23}; \quad Re_{\text{кр}} = 9, \quad (5)$$

где m – пористость зерновой массы, в пределах единицы [4].

При $10 < Re < 10\,000$ наступает смешанный режим движения воздуха и скорость фильтрационного потока описывается эмпирической зависимостью

$$\nu = k_{\text{Л}} \left(\frac{\Delta P}{\rho_B L g} \right)^a, \quad (6)$$

где $a < 1$ – эмпирический коэффициент, описывающий вклад турбулентности в ламинарный поток воздуха.

При $Re > 10\,000$ наступает турбулентная фильтрация (квадратичный закон сопротивления), при этом $a = 0,5$ и скорость фильтрации

$$\nu = k_{\text{T}} \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_B L g}}, \quad (7)$$

где k_T – коэффициент турбулентной фильтрации, м/с, для крупнозернистых частиц определяют по эмпирической зависимости [5]

$$k_T = \left(20 - \frac{14}{d'_z} \right) m \sqrt{d'_z}, \quad (8)$$

где d'_z – диаметр зернистой частицы пористой среды, мм.

Выделение не решённых ранее частей общей проблемы. Проведём расчёт скорости фильтрационного потока в насыпи зерна пшеницы при следующих исходных данных: $\Delta P = 1; 10; 100; 1000$ Па; $L = 5$ м; $d_z = 0,00376$ м; $m = 0,42$; $\rho_B = 1,3$ кг/м³; $c = 21 \cdot 10^{-4}$; $a = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5$; $\nu = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $d'_z = 3,76$ мм (см. таблицу).

Расчётные значения k_L , k_T и ν в скоплении зерна пшеницы при разных значениях a и ΔP

k_L по формуле (4), м/с	k_L по формуле (4), м/с					k_T по формуле (8), м/с
	$a = 0,1$	$a = 0,2$	$a = 0,3$	$a = 0,4$	$a = 0,5$	
0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,021	0,013
Скорость фильтрационного потока ν, м/с						
По (3)	По формуле (6), смешанный поток					По (7)
$\Delta P = 1$ Па						
0,00033	0,014	0,0091	0,006	0,0039	0,0026	0,0016
$\Delta P = 10$ Па						
0,0033	0,017	0,014	0,012	0,01	0,0082	0,0051
$\Delta P = 100$ Па						
0,033	0,022	0,023	0,024	0,025	0,026	0,016
$\Delta P = 1000$ Па						
0,33	0,027	0,036	0,048	0,063	0,082	0,051

Рассчитаем коэффициент ламинарной и турбулентной фильтрации по формулам (4) и (8) соответственно. Установлено, что коэффициент турбулентной фильтрации в скоплении зерна пшеницы меньше коэффициента ламинарной фильтрации. Рассчитаем скорость фильтрационного потока при ламинарном, смешанном и турбулентном режиме течения воздуха по формулам (3), (6) и (7) соответственно. Показано существенное влияние перепада давления на скорость потока в скоплении зерна пшеницы. Однако без экспериментальных данных невозможно определить корректность результатов расчёта смешанного потока воздуха по формуле (6), поскольку непонятно, чему равен коэффициент a – это существенный недостаток предложенного ранее

метода расчёта А.А. Павловского. Также этот метод не учитывает изменение плотности воздуха межзернового пространства и температуры по толщине скопления при образовании очага повышенной тепловой активности внутри насыпи. Поэтому необходимо провести математическое моделирование процесса фильтрации воздуха в пористой среде под действием тепловой депрессии по квадратичному закону сопротивления [6], чтобы установить влияние температуры на фильтрацию воздуха.

Цель работы – создать математическую модель движения воздуха в порах зерновой массы и установить аналитические зависимости скорости ламинарного, турбулентного и смешанного движения воздуха в межзерновом пространстве от температуры.

Материалы и результаты исследования. Представим самонагревающийся слой зерна в виде отдельного очага повышенной тепловой активности внутри скопления (рис. 1), где в достаточном для аэробного окисления количестве содержится кислород в межзерновом пространстве.

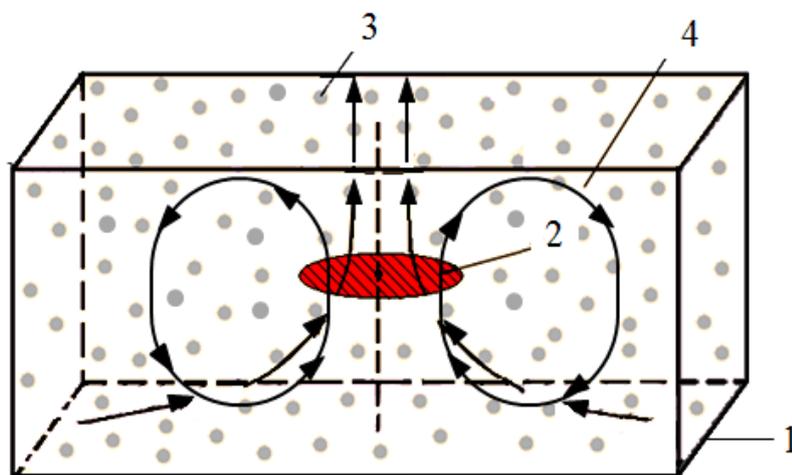


Рис. 1. Схема образования фильтрационного потока в хранилище с зерновой массой:

- 1 – проницаемая горизонтальная поверхность; 2 – очаг повышенной тепловой активности;
 3 – зернистая частица; 4 – межзерновое пространство;
 —————> — направление фильтрационного потока

Тепловая депрессия возникает тогда, когда плотность воздуха начинает изменяться по толщине пористой среды в направлении фильтрации. Формула для определения тепловой депрессии может быть представлена в виде

$$h = (\rho - \rho_0)g, \quad (9)$$

где ρ – переменная по высоте плотность воздуха в порах зерновой массы, кг/м^3 ;
 ρ_0 – плотность воздуха при нормальных условиях, кг/м^3 .

Связь плотности воздуха с температурой описана формулой [7]

$$P = \rho RT, \quad (10)$$

где P – давление, Па;

R – газовая постоянная, Па·м³/(К·кг);

T – переменная по толщине температура, К.

Поскольку давление P меняется незначительно по сравнению с начальным давлением P_0 , Па, то можно принять $P \approx P_0$. Это позволяет придать формуле (8) вид

$$\rho T = \rho_0 T_0, \quad (11)$$

где T_0 – температура при нормальных условиях, К.

Подставляя в формулу (7) зависимость (9), получим

$$h = -\rho_0 \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) g. \quad (12)$$

При расчете движения воздуха через зерно будем учитывать внешнее сопротивление, образующееся между молекулами воздуха и зёрнами, а сопротивлением между молекулами воздуха пренебрежём. При малых скоростях движения воздуха в зерновой массе сила сопротивления выражает действие лишь вязкостных сил. Если же скорость движения воздуха высокая, то в потоке воздуха возникают инерционные силы в результате действия которых сила сопротивления пропорциональна квадрату скорости воздуха. Поэтому для описания движения воздуха в порах зерновой массы используем квадратичный закон сопротивления [7], учитывая при этом тепловую депрессию:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} = \left(\frac{\nu}{k_\phi} + \frac{\lambda \nu}{\sqrt{k_\phi}} \right) \rho \nu - \left(1 - \frac{T_0}{T} \right) \rho_0 g, \quad (13)$$

где x – координата по толщине скопления, м;

k_ϕ – коэффициент проницаемости пористой среды, м²;

λ – турбулентность фильтрационного потока в пористой среде.

По всей высоте скопления вместо уравнения (13) для осреднённых параметров получим

$$\left(\frac{\nu}{k_\phi} + \frac{\lambda \nu}{\sqrt{k_\phi}} \right) \rho \nu = -\frac{h_0}{L} - \left(1 - \frac{T_0}{T_{cp}} \right) \rho_0 g, \quad (14)$$

где h_0 – внешняя депрессия, создаваемая напором ветра, Па;

T_{cp} – средняя температура потока по толщине скопления, К.

При хранении зерна в закрытых объемах примем, что внешняя депрессия отсутствует, т.е. $h_0 = 0$. Тогда уравнение (14) с учётом (11) примет вид

$$\left(\frac{v}{k_\phi} + \frac{\lambda v}{\sqrt{k_\phi}} \right) v = \left(\frac{T_{\text{ср}}}{T_0} - 1 \right) g. \quad (15)$$

Преобразуем уравнение (15) к виду

$$(v + \lambda v \sqrt{k_\phi}) v = k_\phi \left(\frac{T_{\text{ср}}}{T_0} - 1 \right) g. \quad (16)$$

При ламинарном режиме движения воздуха ($\lambda = 0$) формула для определения скорости фильтрационного потока воздуха принимает вид

$$v_{\text{л}} = \frac{k_\phi}{v} \left(\frac{T_{\text{ср}}}{T_0} - 1 \right) g. \quad (17)$$

Для массовой скорости $\frac{\rho v}{\rho_0} = \frac{T_0 v}{T_{\text{ср}}} = \tilde{v}$, м/с, формула (17) имеет вид

$$\tilde{v}_{\text{л}} = \frac{k_\phi}{v} \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{ср}}} \right) g. \quad (18)$$

Разрешая квадратное уравнение (16) относительно скорости воздуха, получим зависимость

$$v = -\frac{v}{2\lambda\sqrt{k_\phi}} + \sqrt{\frac{v^2}{4\lambda^2 k_\phi} + \frac{\sqrt{k_\phi} \left(\frac{T_{\text{ср}}}{T_0} - 1 \right) g}{\lambda}}, \quad (19)$$

которая описывает смешанный режим движения потока воздуха.

При турбулентном режиме движения воздуха ($v = 0$) формула (19) примет вид

$$v_{\text{т}} = \sqrt{\frac{\sqrt{k_\phi} \left(\frac{T_{\text{ср}}}{T_0} - 1 \right) g}{\lambda}}. \quad (20)$$

Формула (20) иллюстрирует, какое существенное влияние может оказывать проницаемость вещества на скорость движения воздуха. Так, при

отсутствии проницаемости ($k_\phi = 0$) эта скорость будет равна нулю. Для массовой скорости формула (20) имеет вид

$$\tilde{v}_T = \sqrt{\frac{\sqrt{k_\phi} \left(1 - \frac{T_0}{T_{cp}}\right) g}{\lambda \frac{T_{cp}}{T_0}}}. \quad (21)$$

При анализе уравнения (19) видно, что при $\lambda = 0$ возникает неопределённость типа $\left\{v = \frac{x}{0} = \infty\right\}$, поэтому, чтобы избавиться от неё, перепишем уравнение (19) в виде

$$v = - \underbrace{\frac{v}{2\lambda\sqrt{k_\phi}}}_b + \underbrace{\sqrt{\frac{v^2}{4\lambda^2 k_\phi} + \frac{\sqrt{k_\phi} \left(\frac{T_{cp}}{T_0} - 1\right) g}{\lambda}}}_a = \frac{(a-b)(a+b)}{(a+b)}. \quad (22)$$

После математических преобразований уравнения (22) получаем обобщённую аналитическую зависимость, описывающую смешанный и турбулентный режим

$$v = \frac{\sqrt{k_\phi} \left(\frac{T_{cp}}{T_0} - 1\right) g}{\frac{v}{2\sqrt{k_\phi}} + \sqrt{\frac{v^2}{4k_\phi} + \sqrt{k_\phi} \lambda \left(\frac{T_{cp}}{T_0} - 1\right) g}}. \quad (23)$$

Для массовой скорости формула (23) имеет вид

$$\tilde{v} = \frac{\sqrt{k_\phi} \left(1 - \frac{T_0}{T_{cp}}\right) g}{\frac{v}{2\sqrt{k_\phi}} + \sqrt{\frac{v^2}{4k_\phi} + \sqrt{k_\phi} \lambda \left(\frac{T_{cp}}{T_0} - 1\right) g}}. \quad (24)$$

Уравнения (18) и (21) являются частными случаями уравнения (24).

На рис. 2 представлены зависимости скорости фильтрационного потока воздуха при трёх режимах движения от безразмерной средней температуры в скоплении зерна пшеницы при следующих исходных данных: $T_0 = 293$ К; $k_{\phi} = 6,21 \cdot 10^{-11}$ м²; $\nu = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $g = 9,81$ м/с²; $\lambda = 0,93$ [8]; $\lambda = 0,1$ (при смешанном режиме).

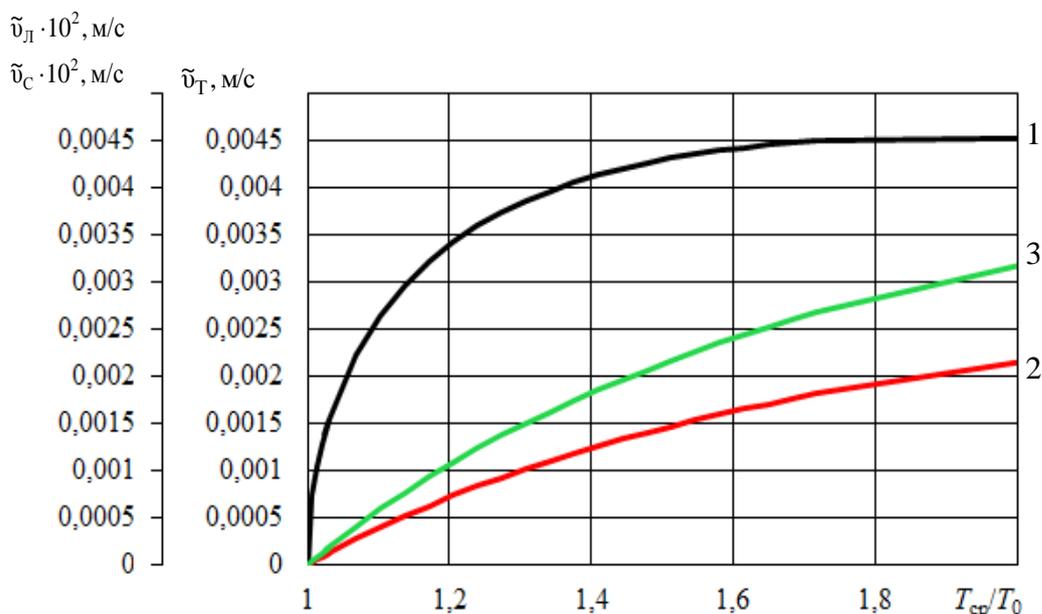


Рис. 2. Зависимость массовой скорости потока воздуха от безразмерной средней температуры в скоплении зерна пшеницы:

\tilde{v}_c — скорость смешанного фильтрационного потока воздуха, м/с; 1 — турбулентный режим; $\nu = 0$; $\lambda = 0,93$; 2 — ламинарный режим; $\nu = 1,4 \cdot 10^{-5}$ м²/с; $\lambda = 0$; 3 — смешанный режим; $\nu = 9,5 \cdot 10^{-6}$ м²/с; $\lambda = 0,1$

Из анализа результатов, представленных на рис. 2, следует, что в межзерновом пространстве пшеницы преобладает турбулентный фильтрационный поток воздуха вследствие разнообразия поровых каналов. При этом чем больше средняя температура межзернового пространства внутри скопления, тем больше будет скорость фильтрационного потока воздуха, но при определённой температуре скорость перестаёт увеличиваться, что свидетельствует о достижении пожароопасного фильтрационного потока. Для сравнения, фильтрационные потоки воздуха через скопления углей различной химической активности и толщины находятся в пределах $2 \cdot 10^{-3} \dots 2 \cdot 10^{-6}$ м/с [8].

Вывод. При математическом описании движения воздуха в порах зерновой массы под действием тепловой депрессии получены аналитические зависимости скоростей фильтрационного потока для ламинарного, смешанного и турбулентного режимов от температуры и коэффициента проницаемости, что ранее в литературе не рассматривалось. Полученные результаты в дальнейшем

планируется использовать при моделировании температуры в хранилище с зерном с учётом возникновения фильтрационного потока воздуха.

Список литературы / References

1. Юкиш, А.Е. Техника и технология хранения зерна / А.Е. Юкиш, О.А. Ильина. – М.: Дели принт, 2009. – 717 с.

Yukish, A.Ye., Il'ina, O.A. *Tekhnika i tekhnologiya khraneniya zerna* [Technics and technology of grain storage]. Moscow, DeLi print Publ., 2009, 717 p.

2. Буркина, Р.С. Очаговое тепловое воспламенение в пористой среде в условиях естественной фильтрации газа / Р.С. Буркина, Е.А. Козлов // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37, № 2. – С. 35 – 41.

Burkina, R.S., Kozlov, Ye.A. *Ochagovoye teplovoye vosplamneniye v poristoy srede v usloviyakh yestestvennoy filtratsii gaza* [The hearth heat inflammation in the porous environment under conditions of the natural gas filtration]. *Fizika gorennya i vzryva – Physics of combustion and explosion*, 2001, vol. 37, no. 2, pp. 35 – 41.

3. Маскет, М. Течение однородных жидкостей в пористой среде / М. Маскет; пер. с англ. М.А. Геймана. – М.; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2004. – 628 с.

Muskat, M. *Techeniye odnorodnykh zhidkostey v poristoy srede* [The flow of homogeneous fluids through porous media]. Translation from English by M.A. Geyman. Moscow; Izhevsk: Research center “The regular and chaotic dynamics” 2004, 628 p.

4. Цык, В.В. Послеуборочная обработка и хранение зерна / В.В. Цык. – Горки: БГСХА, 2014. – 268 с.

Tsyk, V.V. *Posleuborochnaya obrabotka i khraneniye zerna* [Postharvest treatment and grain storage]. Gorki, BGSKhA, 2014, 268 p.

5. Бейсембин, К.Р. Гидравлический расчёт боковых фильтрующих водозаборных сооружений / К.Р. Бейсембин // Наука и новые технологии. – 2012. – № 4. – С. 35 – 39.

Beysemin, K.R. *Gidravlicheskiy raschyet bokovykh fil'truyuscshikh vodozabornykh sooruzheniy* [The hydraulic calculation of side filter water intake structures]. *Nauka i novyye tekhnologii – Science and new technologies*, 2012, no. 4, pp. 35 – 39.

6. Белолипецкий, В.М. Некоторые вопросы теории фильтрации и гидродинамической устойчивости / В.М. Белолипецкий, В.Б. Бекежанова. – Красноярск: ФГОУВПО «Сибирский федеральный университет», 2007. – 55 с.

Belolipetskiy, V.M., Bekezhanova, V.B. *Nekotoryye voprosy teorii fil'tratsii i gidrodinamicheskoy ustoychivosti* [Some problems of the filtering and hydrodynamic stability theory]. Krasnoyarsk: FGOUVPO “Sibirskiy federal'nyy universitet”, 2007, 55 p.

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

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

8. Греков, С.П. Расчёт пожаробезопасных скоростей фильтрации воздуха через угольное скопление / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2006. – Вып. 43. – С. 24 – 29.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B. *Raschyot pozharobezopasnykh skorostey fil'tratsii vozdukha cherez ugol'noye skopleniye* [Calculation of fire-safe velocities of filtration of air through the coal accumulation]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2006, issue 43, pp. 24 – 29.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 15.02.2018

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), head of department, e-mail: obep.niigd@list.ru;
Igor Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: zinstar@mail.ru;
Kristina Valeriyevna Hlushenko, research associate; e-mail: kristina.hlushenko@mail.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-81

THERMAL DROP OF VENTILATION PRESSURE BY SPONTANEOUS HEATING THE GRAIN ACCUMULATION

Purpose. To work out the mathematical model of air movement in the pores of the grain mass and to ascertain the analytical dependences of the velocity of the laminar, turbulent and mixed air movement in the intergranular space on the temperature

Methods. Application of the square resistance law and of the gas equation by the mathematical description of the air flow movement.

Results. It is shown that the formation of the thermal hyperactivity seat in the interior of the grain accumulation results in origin of the thermal drop of the ventilation pressure at the expense of difference of air densities and in the wake of air movement from the bottom upwards in the gas phase of the intergranular space. By the mathematical description of the filtration air flow in the interior of the grain accumulation it is ascertained that the velocity grows up to the defined temperature value corresponding to the fire-hazardous flow velocity.

Scientific novelty. The analytical dependences of the velocities of the laminar, turbulent and mixed air movement on the permeability of the environment and the average flow temperature in thickness of the accumulation were proposed for the first time.

Practical value. One can apply the results obtained to forecast the fire-hazardous situation in the grain mass storage.

Key words: *grain mass; permeability; spontaneous heating seat; thermal drop of ventilation pressure; filtration flow; laminar-flow conditions; turbulent-flow conditions.*

УДК 630*432.18

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. (+38 062) 332-78-44*

ЛОКАЛИЗАЦИЯ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Цель. Планирование сети противопожарных барьеров в лесных массивах как способа предотвращения распространения низовых лесных пожаров.

Методика. Анализ литературных источников по вопросу планирования сети противопожарных барьеров в лесных массивах как способа предотвращения распространения низовых лесных пожаров.

Результаты. Определены современные тенденции проведения противопожарного обустройства лесных массивов при создании противопожарных барьеров.

Научная новизна. Исследованы факторы, влияющие на выбор вида, ширины и мест расположения противопожарных барьеров при проведении мероприятий по предупреждению распространения лесных пожаров в степной зоне. Предложена систематизация существующих противопожарных барьеров и правила создания системы противопожарных барьеров.

Практическая значимость. Систематизация противопожарных барьеров и правила создания системы таких барьеров позволяют выполнить проект противопожарного обустройства лесных массивов.

Ключевые слова: *лесной пожар; высота пламени; скорость распространения лесного пожара; кромка пожара; лесная подстилка; лесные горючие материалы; низовой пожар; минерализованная полоса; подрост; подлесок.*

Постановка проблемы и ее связь с актуальными научными и практическими исследованиями. На территориях лесных массивов ДНР, занимающих более 51000 га, ежегодно возникает более 100 пожаров и загораний. Все лесные пожары представляют чрезвычайную опасность, поскольку к началу локализации они, как правило, успевают охватить большие площади. Особенно опасны массовые пожары в условиях засушливой погоды. При этом возникает угроза задымления и уничтожения огнем населенных пунктов, объектов народного хозяйства, расположенных в лесных массивах. Опасным считается задымление на открытой местности, при котором видимость не превышает 10 м. Концентрация оксида углерода в воздухе около 0,2 % вызывает смертельные отравления в течение 30...60 мин, а 0,7 % - в течение нескольких минут. Предотвращение возникновения и распространения лесных пожаров признано актуальной задачей всем мировым сообществом. Для разработки мероприятий по недопущению возникновения и распространения пожаров необходимо понимание процессов и знание факторов, определяющих возможность загорания древостоя и распространения горения по нему. Направления исследований по предупреждению возникновения и распространения пожаров в лесах путем повышения пожароустойчивости

насаждений, регулирования состава древостоев и создания системы противопожарных барьеров, сети дорог и водоемов основаны на выявлении источников риска возникновения пожара путем анализа пожаров. Разработка и принятие на системном уровне необходимых мер, направленных на снижение потенциальной угрозы возникновения и распространения лесных пожаров, представляется оправданной и актуальной.

Цель исследований – планирование сети противопожарных барьеров в лесных массивах для предотвращения распространения низовых лесных пожаров.

Изложение основного материала исследования. Авторы исследований пожарной опасности в лесах С.А. Бокадаров и Р.Ю. Поляков [1] утверждают, что вероятность возникновения пожара в лесах определяется антропогенной, природной пожарной опасностью и пожарной опасностью по условиям погоды, и считают, что для снижения пожарной опасности в лесах достаточно воздействовать на одну из трех указанных составляющих. Пожарная опасность по условиям погоды – фактор нерегулируемый. Следовательно, воздействовать можно только на оставшиеся два фактора. В регионах с высокой плотностью населения и интенсивной производственной деятельностью леса испытывают высокую антропогенную нагрузку. Такие леса в первую очередь нуждаются в противопожарном обустройстве. Это может быть достигнуто созданием сети противопожарных барьеров. Авторы отмечают, что в настоящее время основополагающие вопросы, касающиеся планирования этих мероприятий, методов анализа и принятия управляющих решений отсутствуют. Многообразие природных, пирологических и лесорастительных условий не позволяет использовать одни и те же требования для лесных массивов с различными классами природной пожарной опасности. В основу разработки противопожарных мероприятий необходимо закладывать создание противопожарных выделов с учетом типа лесных насаждений и лесных участков, их природными и другими особенностями, определяющими состав, количество и распределение лесных горючих материалов, а также влажность этих материалов. Следующим этапом разработки противопожарного обустройства лесных массивов является выбор вида противопожарных барьеров для отграничения противопожарных выделов. В основу выполнения данного этапа необходимо закладывать анализ пожаров для определения мест вероятного риска их возникновения. Практика показывает, что лесные пожары, которые возникают на лесной территории (как покрытой, так и не покрытой лесом), часто являются следствием пожаров, происходящих на нелесной, но смежной с лесом, территории. Так называемые сельскохозяйственные палы, имеющие целью выжигание луговой травянистой растительности, оставшейся от прошлого сезона, являются одной из причин возникновения пожаров в лесах нашего региона. Результаты исследований Г.Л. Главадского и В.А. Шмакова [2] подтверждают возможность предотвращения перехода лугового пожара в лесной с помощью создания противопожарных барьеров.

Для систематизации причин возникновения пожаров необходимо понимание, какая часть (или части) лесного фитоценоза является местом возникновения и проводником распространения лесного пожара. Это достигается путем разделения пожаров по воздействию огня на отдельные элементы насаждения и основано на том, какая часть лесных насаждений подвергается воздействию огня. Лесные пожары разделяют на три вида: низовые (сгорает лесная подстилка, лишайники, мхи, травы, опавшие на землю ветки и т.д); верховые; подземные или торфяные. Устойчивый низовой пожар развивается обычно летом, горение продолжается длительное время. Здесь могут развиваться условия для развития верховых пожаров. По скорости распространения и высоте пламени низовые и верховые пожары разделяются на сильные, средние и слабые (табл. 1).

Таблица 1

Показатели пожара

Параметр пожара	Значение показателя		
	слабый	средний	сильный
Низовой пожар			
Скорость распространения огня, м/мин	До 1	1...3	Более 3
Высота пламени, м	До 0,5	0,5...1,5	Более 1,5
Верховой пожар			
Скорость распространения огня, м/мин	До 3	3...100	Более 100
Подземный пожар			
Глубина прогорания, см	До 25	25...50	Более 50

Основным способом предотвращения распространения низового пожара и перехода одного вида пожара в другой является создание сети противопожарных барьеров, т.е. участков территории, препятствующих распространению лесных пожаров.

Для определения составляющих элементов данной сети имеет смысл противопожарные барьеры по структурным характеристикам условно разделить на две группы:

- первая группа – естественные противопожарные барьеры. К ним относим противопожарные барьеры с отсутствием горючих материалов (река, озеро, каменные россыпи);

- вторая группа – искусственные противопожарные барьеры, их разделяем на следующие три подгруппы:

подгруппа Па - с наличием растительных материалов в количествах, не достаточных для поддержания и распространения горения;

подгруппа Пб - с наличием растительных материалов, по различным причинам не способных к горению и распространению огня;

подгруппа Пв - комбинированные противопожарные барьеры, сочетающие элементы предыдущих видов барьеров.

К искусственным противопожарным барьерам подгруппы Па относим:

- минерализованные полосы;
- лесные дороги, трассы железных и автомобильных дорог, охранные зоны линий электропередач, трубопроводов, квартальные просеки и т.д.

К искусственным противопожарным барьерам подгруппы Пб относим:

• пожароустойчивые опушки. Создаются из древостоев лиственных пород. При невозможности создания пожароустойчивых опушек из лиственных пород создают пожароустойчивые опушки из древостоев хвойных пород. Пожароустойчивые опушки создают путем очистки территории от сухостоя, подроста, подлеска и очистки ствола деревьев от сучьев и веток хвойных деревьев на высоту 2 м от уровня земли. Порубочные остатки удаляют с площади пожароустойчивых опушек. По границам таких опушек с внешней и внутренней (к лесу) стороны прокладывают минерализованные полосы;

- полосы, обработанные растворами химических веществ;
- полосы, созданные посевом огнестойких растений.

К искусственным противопожарным барьерам подгруппы Пв относим:

• противопожарный разрыв – специально созданный в лесу разрыв в виде просеки, очищенной от горючих материалов, с дорожной трассой посередине и двумя минерализованными полосами по сторонам. Противопожарный разрыв предназначен для остановки распространения верховых и сильных низовых лесных пожаров и использования в качестве опорных полос при тушении пожара;

• противопожарные заслоны – комбинированный (сложный) противопожарный барьер в лесу, предназначенный для остановки верховых пожаров. Состоит из противопожарных разрывов в сочетании с пожароустойчивыми опушками из древостоев лиственных пород по обеим сторонам его, очищенных от наземных горючих материалов и расчленённых сетью минерализованных полос через 20...30 м. Противопожарные заслоны могут быть из полосы лиственного леса без противопожарных разрывов. Максимальная ширина основных противопожарных заслонов может быть 300...350 м, дополнительных – до 150 м. Создаётся, как правило, замкнутая сеть противопожарных заслонов, разбивающая лес на блоки.

Систематизация видов противопожарных барьеров позволит упростить правила создания системы противопожарных барьеров и изложить их в следующем виде:

- использовать имеющиеся на территории лесного фонда противопожарные барьеры первой группы в качестве основы для создания сети противопожарных барьеров;

- устраивать противопожарные барьеры дополнительно к существующим, если для ограничения блока противопожарных барьеров первой группы и подгруппы Па недостаточно;
- располагать трассы противопожарных барьеров второй группы перпендикулярно господствующим ветрам;
- совмещать противопожарные разрывы с квартальными просеками при наличии возможности устройства дороги;
- расширять квартальную просеку до 4...6 м при размещении на ней противопожарных разрывов;
- противопожарные разрывы выполнять по схеме: минерализованная полоса – дорога – минерализованная полоса шириной, обеспечивающей нейтрализацию воздействия излучающего теплового потока на противоположной от места возникновения пожара стороне минерализованной полосы (при отсутствии дороги, с минерализованной полосы посередине противопожарного разрыва);
- крупные лесные массивы расчленять противопожарными барьерами на более мелкие замкнутые блоки;
- противопожарные барьеры в виде противопожарных заслонов выполнять по схеме:
лес – минерализованная полоса – пожароустойчивая опушка из древостоев лиственных пород – противопожарный разрыв – противопожарная опушка из древостоев лиственных пород – минерализованная полоса – лес, если лес состоит из древостоя лиственных пород (рис.1);
лес – минерализованная полоса – через 10 м следующая минерализованная полоса – пожароустойчивая опушка из древостоев лиственных пород – противопожарный разрыв – пожароустойчивая опушка из древостоев лиственных пород – минерализованная полоса – через 10 м следующая минерализованная полоса – лес или лес – минерализованная полоса – через 10 м следующая минерализованная полоса – пожароустойчивая опушка из древостоев хвойных пород – противопожарный разрыв – пожароустойчивая опушка из древостоев хвойных пород – минерализованная полоса – через 10 м следующая минерализованная полоса – лес, если лес состоит из древостоя хвойных пород (рис. 2);
- создавать замкнутую сеть противопожарных барьеров, разбивающую лес на блоки (пожарные выделы).



Рис. 1. Схема противопожарного обустройства лесных массивов лиственных пород с использованием искусственных противопожарных барьеров подгруппы Пв:

— минерализованная полоса; — лес; — противопожарный разрыв

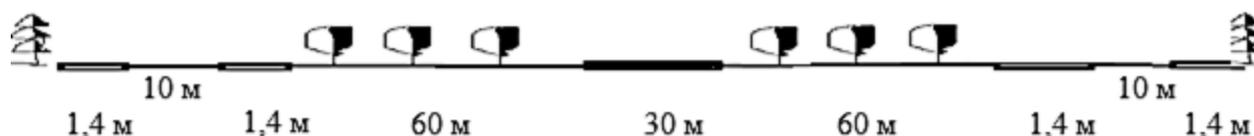


Рис. 2. Схема противопожарного обустройства лесных массивов хвойных пород с использованием искусственных противопожарных барьеров подгруппы Пв:

— минерализованная полоса; — лес; — противопожарный разрыв

Для нашего региона самым распространенным противопожарным мероприятием в лесном фонде является создание противопожарных барьеров в виде минерализованных полос по периметру охраняемых объектов, так как изначально лесные насаждения высаживались искусственно блоками ограниченной площади.

Минерализованная полоса создается путем очистки территории от наземных горючих материалов на ширину, обеспечивающую нейтрализацию воздействия излучающего теплового потока (табл. 2). Разогревание наземных горючих материалов зависит от высоты и температуры пламени теплового источника и наличия ветра.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований эффективности минерализованных полос

Авторы исследований	Ширина минерализованной полосы, м	Высота пламени, м	Эффективность минерализованной полосы, %	Примечание
В.В. Фуряев, Н.П. Курбатский [1]	1,4	< 1,5	62 %	—
	2,8		88 %	—
	4,2		100 %	—
П.Н. Гоман [3]	4	< 1,5	—	Время действия минерализованной полосы шириной 4 м 2,8 мин
	5		—	При отсутствии возможности прекращения теплового излучения пожара на надпочвенный покров леса в течение 2,8 мин
С.В. Залесов [4]	4	< 1,5	0	При ветреной погоде увеличивать ширину минерализованной полосы до десятикратной высоты травостоя
И.Я Чеплянский [5] (для степной зоны)	1,4	≥ 1,5	0	Вдоль дорог необходимо вырубать деревья на 20 м и прокладывать две минерализованные полосы: одну 2,8 м прокладывать вдоль опушки, а вторую 1,4 м на расстоянии 3 м от обочины дороги

Практика показывает, что если самостоятельно минерализованная полоса не может остановить низовой пожар и переход его в верховой, необходимо провести дополнительные мероприятия в виде расширения противопожарной полосы путем создания пожароустойчивых опушек из древостоев лиственных пород или пожароустойчивых опушек из древостоев хвойных пород.

Из анализа проведенных исследований законодательной базы следует, что единых требований к устройству противопожарных барьеров в лесных массивах и методам расчета требуемой ширины минерализованных полос нет.

Выводы. Для обеспечения прекращения распространения низового лесного пожара необходимо выполнить противопожарное обустройство зон риска возникновения пожара на лесной территории путем создания сети противопожарных барьеров с учетом характерных для нашего региона высокой температуры воздуха, низкой влажности и отсутствия осадков в летнее время. При определении ширины противопожарного разрыва в виде минерализованной полосы, гарантирующей остановку распространения низового пожара, необходимо производить расчет исходя из наилучших прогнозов распространения пожара. При таком подходе нужно моделировать высоту пламени по показателям сильного низового пожара для самых пожароопасных условий (принимать, что в момент возникновения пожара влажность воздуха будет минимальной, температура воздуха и скорость ветра – характерные для развития сильного низового пожара).

Систематизация противопожарных барьеров, как и правила создания системы их, позволят разработать проект противопожарного обустройства лесных массивов наглядным и легко воспринимаемым.

Список литературы / References

1. Бокадаров, С.А. Пути снижения пожарной опасности лесов / С.А. Бокадаров, Р.Ю. Поляков. – Воронеж, 2007 [Электронный ресурс]. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-snizheniya-pozharnoy-opasnosti-lesov-1.pdf> (дата обращения: 14.02.2018).

Bokadarov, S.A., Polyakov, P.Yu. *Puti snizheniya pozharnoy opasnosti lesov* [Ways of reduction of the fire hazard of forests]. Voronezh, 2007 [Electronic resource]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/puti-snizheniya-pozharnoy-opasnosti-lesov-1.pdf> (accessed: 14.02.2018).

2. Пат. 2206352 RU, МПК А 62 С 3/02. Способ реконструкции противопожарных минерализованных полос / Г.Д. Главацкий, В.А. Шмаков (RU); заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной охраны лесов и механизации лесного хозяйства. – № 2002110349/12; заявл. 18.04.02; опубл. 20.06.03. Бюл. № 11.

Glavatskiy, G.D., Shmakov, V.A. *Sposob rekonstruktsii protivopozharnykh mineralizovannykh polos* [The method of reconstruction of fire-prevention mineralized stripes]. Patent RF, no. 2206352, 2002.

3. Гоман, П.Н. Рекомендации по созданию противопожарных барьеров лесных низовых пожаров для аномально засушливых периодов / П.Н. Гоман //

Вестник командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь. – 2013. – № 2(18). – С. 62 – 65.

Goman, P.N. *Rekomendatsii po sozdaniyu protivopozharnykh bar'yerov lesnykh nizovykh pozharov dlya anomal'no zasushlivykh periodov* [Recommendations on creation of fire-prevention barriers of forest creeping fires for abnormally dry periods]. *Vestnik komandno-inzhenernogo instituta MChS Respubliki Belarus* [Bulletin of the Engineering-command Institute, Ministry of Extraordinary Situations of the Republic of Belarus]. 2013, no. 2(18), pp. 62 – 65.

4. Залесов, С.В. Охрана лесов от пожаров / С.В. Залесов, Е.С. Залесова, А.С. Оплетаяев. – Екатеринбург: Урал. гос. лесотехн. ун-т, 2013. – 62 с.

Zalesov, S.V., Zalesova, Ye.S., Opletayev, A.S. *Okhrana lesov ot pozharov* [Forest conservation from fires]. Yekaterinburg, Ural. gos. lesotekhn. un-t Publ., 2013, 62 p.

5. Чеплянский, И.Я. Применение минерализованных полос в борьбе с пожарами в степной зоне европейской части России / И.Я. Чеплянский [Электронный ресурс]. URL: <https://borbe-s-pozharami-v-stepnoy-zone-evropeyskoy-chasti-rossii> (дата обращения: 14.02.2018).

Cheplyanskiy, I.Ya. *Primeneniye mineralizovannykh polos v bor'be s pozharami v stepnoy zone yevropeyskoy chasti Rossii* [The use of mineralized stripes in fighting the fires in the steppe zone of the European part of Russia]. [Electronic resource]. Available at: <https://borbe-s-pozharami-v-stepnoy-zone-evropeyskoy-chasti-rossii> (accessed: 14.02.2018).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 15.02.2018

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 DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-44

LOCALIZATION OF CREEPING FOREST FIRES

Purpose. Planning the net of fire-prevention barriers in forest massifs as a method of the spread avoidance of the creeping forest fires.

Methods. Analysis of literary sources on the problem of planning the net of the fire-prevention barriers in the forest massifs as the method of spread avoidance of the creeping forest fires.

Results. The contemporary tendencies have been determined by carrying-out the fire-prevention construction of the forest massifs by creation of the fire-prevention barriers.

Scientific novelty. The factors influencing on choice of form, width and situation of the fire-prevention barriers were investigated by carrying-out the measures on prevention of spread of the forest fires in the steppe zone. The systematization of the existing fire-prevention barriers and regulations for creation of the fire-prevention barriers system were proposed.

Practical value. The systematization of the fire-prevention barriers and regulations for creation of the system of such barriers allow implementing the project of the fire-prevention construction of the forest massifs.

Key words: forest fire; flame height; spreading rate of the forest fire; fire edge; forest floor; forest combustible materials; creeping fire; mineralized stripe; regrowth; undergrowth.

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.841.22:001.891.572

Ирина Геннадиевна Старикова, канд. техн. наук, ученый секр.; e-mail: ir-starik@yandex.ru;

Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, ст. науч. сотр.; e-mail: zinstar@mail.ru;

Кристина Валериевна Глушенко, мл. науч. сотр.; e-mail: kristina.hlushenko@mail.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81;

Александр Александрович Подрухин, науч. сотр.; e-mail: ifgpdnr@mail.ru

Государственное учреждение «Институт физики горных процессов»

283114, Донецк, ул. Р. Люксембург, 72. Тел. (+38 062) 381-17-85

ФИЛЬТРАЦИЯ ВОЗДУХА В СКОПЛЕНИИ ЗЕРНИСТОГО ВЕЩЕСТВА РАСТИТЕЛЬНОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

Цель. Совершенствование метода определения скорости ламинарного фильтрационного потока воздуха в скоплении пористого вещества.

Методика. Математическая обработка и анализ литературных данных.

Результаты. При расчёте фильтрационного потока воздуха внутри скопления зерен пшеницы установлено, что скорость зависит от толщины дисперсной среды и коэффициента проницаемости. На значение коэффициента проницаемости оказывает влияние пористость, которая зависит от формы и размера вмещающих частиц. Поэтому, применяя геометрические характеристики частиц пористой среды, можно определить скорость фильтрационного потока при образовании очага повышенной тепловой активности в насыпи вещества.

Научная новизна. Предложены эмпирические зависимости пористости от эквивалентного диаметра частицы и проницаемости от пористости вещества, причём последняя зависимость описывается по степенному закону, что ранее исследователи не учитывали.

Практическая значимость. Полученные результаты можно применять для прогнозирования возникновения пожароопасного фильтрационного потока в скоплении вещества.

Ключевые слова: зернистое вещество; пористость; проницаемость; ламинарный фильтрационный поток; математический анализ.

Постановка проблемы. Обеспечение сохранности запасов комбикормов и зернопродуктов без потерь и снижения качества – важная задача в ДНР. Эта задача решается путём применения новой технологии хранения зернопродуктов в регулируемой среде инертных газов или активного вентилирования. Однако в настоящее время ещё многие предприятия работают по старой технологии, которая предусматривает хранение продуктов на открытом воздухе, поэтому не исключены случаи образования в процессе переработки зернопродуктов взрывоопасных концентраций горючих пыли и газов, а при длительном хранении компонентов комбикормового сырья в силосах и их самовозгорания. Так, 18.11.2016 в силосе корпорации «ДОНОЙЛ» Донецка произошёл пожар вследствие самовозгорания негранулированного жмыха. Пожар был своевременно ликвидирован, однако повлёк за собой порчу сырья и материальный ущерб.

Скопление зернистого вещества (далее – зерно) представляет собой пористую двухфазную среду: твёрдая фаза – непосредственно зернистое вещество и газовая фаза – поры в самом веществе.

Физическая характеристика воздуха межзернового пространства (плотность, кинематическая вязкость) зависит от дыхания зерна и окислительных процессов, происходящих в зерновой массе. При дыхании органического вещества глюкоза в растительной клетке превращается в промежуточные продукты неполного окисления (метан, угарный газ, водород) и конечные неорганические продукты (диоксид углерода и воду). В результате окислительных реакций аэробного дыхания образуется очаг повышенной тепловой активности и происходит разогревание растительной массы в объёме силоса [1]. Из-за разности плотностей нагретых и холодных частиц воздушного потока начинается естественная конвекция. Тёплый воздух, имея меньшую плотность, движется вверх, а холодный – опускается вниз. Интенсивность естественной конвекции или скорость фильтрационного потока зависит от разности температур холодного и тёплого воздуха, от тепловых условий процесса, объёма пространства и коэффициента проницаемости пористой среды. Фильтрационный поток проникает в поры и пустоты через очаг самонагрева и выходит в атмосферу, создавая пожароопасную ситуацию. Таким образом, представляет интерес определение скорости фильтрационного потока в скоплении зернистого вещества.

Анализ последних исследований и публикаций. Зерновая масса представляет собой двухфазную пористую среду зерно-воздух и относится к сыпучим материалам. Зерно неоднородно по форме, размерам и плотности. Форма зёрен весьма разнообразна и может быть удлинённо-овальной (пшеница); удлинённой (рожь, овёс); яйцевидной (пшеница, фасоль); шарообразной (горох, горчица, рапс); округлой (просо, сорго); эллипсоида вращения (фасоль, соя, бобы). Размеры зерна, в свою очередь, варьируются довольно широко (табл. 1) [1]. Зерна вещества имеют нерегулярную форму и, следовательно, их линейные размеры, определённые в разных направлениях, отличаются друг от друга. Вследствие этого в качестве характеристического линейного размера зерна рассчитывают его эквивалентный диаметр d_z , мм [2]:

$$d_z = \sqrt[3]{a_1 a_2 a_3}, \quad (1)$$

где a_1 – длина зерновой частицы, мм;

a_2 – ширина зерновой частицы, мм;

a_3 – толщина зерновой частицы, мм.

Зерна, имея разнообразную конфигурацию, укладываются с промежутками или порами, заполненными воздухом. Пористость бывает двух видов: первичная и вторичная (рис. 1).

Таблица 1

Средние размеры зёрен различных культур

Культура	Длина a_1 , мм	Ширина a_2 , мм	Толщина a_3 , мм
Рожь	7,3	2,35	2,2
Пшеница	7,6	2,8	2,5
Овёс	13	2,7	2,35
Просо	2,55	2,2	1,65
Рис	7	2,9	3,9
Горох	3,5	3,5	3,5
Гречиха	6,2	4	3,1
Подсолнечник	13,5	6,45	3,75

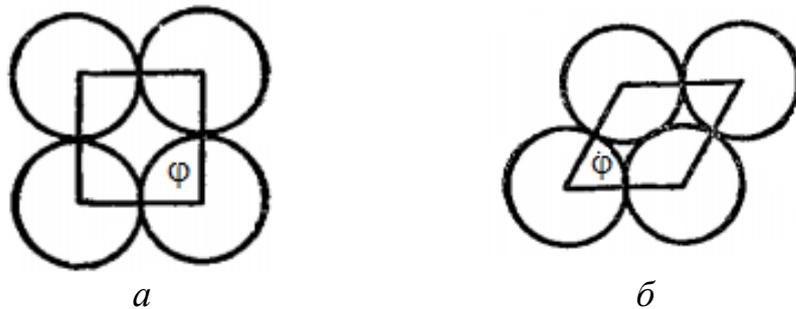


Рис. 1. Влияние расположения зёрен шарообразной формы на пористость:

- a – первичная (наименее плотная) упаковка ($\varphi = 90^\circ$);
 b – вторичная (наиболее плотная) упаковка ($\varphi = 60^\circ$);
 φ – угол при взаимном соприкосновении частиц, ... $^\circ$

Первичная пористость возникает в скоплении зерновой массы за счёт неплотной упаковки при выгрузке продукта (рис. 1, a), а вторичная – при продолжительном хранении в связи с уплотнением продукта (рис. 1, b).

Для количественной характеристики межзернового пространства определяют пористость. Пористость – это отношение объёма, занятого промежутками между твёрдыми частицами зерновой массы, к общему объёму, занятому зерновой массой. Пористость зерна m , % или в пределе единицы (табл. 2), определяют по формуле

$$m = \frac{(W - V)}{W}, \quad (2)$$

где W – общий объём, занимаемый зерновой массой, м^3 ;

V – истинный объём твёрдых частиц зерновой массы, м^3 .

Таблица 2

Эквивалентный диаметр и пористость зёрен различных культур

Культура	Насыпная плотность ρ , кг/м ³	m	d_z , мм	d_z , м
Рожь	680	0,37	3,35	0,00335
Пшеница	730	0,42	3,76	0,00376
Овёс	400	0,6	4,35	0,00435
Просо	680	0,3	2,1	0,0021
Рис	580	0,55	4,3	0,0043
Горох	750	0,45	3,5	0,0035
Гречиха	560	0,52	4,25	0,00425
Подсолнечник	325	0,7	6,9	0,0069

Другой, не менее важной характеристикой пористой среды является коэффициент проницаемости k_ϕ , м². Проницаемость – это свойство зерновой массы пропускать сквозь себя воздух, газы при наличии разности температур в скоплении.

Коэффициент проницаемости пористых сред вытекает из линейного закона фильтрации Дарси, по которому скорость ламинарного фильтрационного потока воздуха v , м/с, в пористой среде пропорциональна градиенту давления Δp , Па, и обратно пропорциональна динамической вязкости воздуха μ , Па·с:

$$v = \frac{Q}{F} = \frac{k_\phi \Delta p}{\mu L}, \quad (3)$$

где Q – объёмный расход воздуха в единицу времени, м³/с;

F – площадь фильтрации, м²;

L – толщина пористой среды, м.

Недостаток зависимости (3) – пренебрежение турбулентным фильтрационным потоком воздуха в пористой среде.

Из уравнения (3) получаем формулу для определения коэффициента проницаемости

$$k_\phi = \frac{Q \mu L}{F \Delta p}. \quad (4)$$

Физический смысл размерности коэффициента проницаемости – это площадь сечения каналов пористой среды зернистого вещества, по которым происходит фильтрация воздуха.

Многими выдающимися учёными (Л.С. Лейбензон, Ч. Сликтер, В.Н. Щелкачёв и др.), занимающимися исследованиями движения газа и газированной жидкости в пористой среде, получены аналитические зависимости для расчёта теоретического коэффициента проницаемости (табл. 3) в зависимости от эквивалентного диаметра частицы d_z , м.

Таблица 3

Аналитические зависимости для расчёта коэффициента проницаемости

Учёный	Предложенная зависимость
Ч. Сликтер	$k_{\phi} = \frac{n^2 d_z^2}{96(1-m)}, \quad (5)$ <p>где $n = 1 - \frac{\pi}{4 \sin \varphi}$ – просветность;</p> $m = 1 - \frac{\pi}{6(1 - \cos \varphi) \sqrt{1 + 2 \cos \varphi}}; \quad 60^\circ < \varphi < 90^\circ$
Эльдифрави	$k_{\phi} = 0,01057 m^3 d_z^2 \quad (6)$
Козени	$k_{\phi} = \frac{m^3 d_z^2}{120(1-m)^2} \quad (7)$
К. Терцаги	$k_{\phi} = \frac{\varepsilon m^2 d_z^2}{(1-m)^{2/3}}, \quad (8)$ <p>где ε – константа, зависящая от структуры зерна: $\varepsilon = 10,5$ – зерно с гладкой поверхностью; $\varepsilon = 6,0$ – зерно с угловатой поверхностью</p>
А.В. Лыков	$k_{\phi} = \frac{d_z^2}{180 \left(\frac{1}{m} - 1 \right)^2} \quad (9)$

Выделение не решённых ранее частей общей проблемы. Проведём теоретический расчёт скорости ламинарного фильтрационного потока в насыпи зерна пшеницы при следующих исходных данных: $\Delta p = 0,5; 1; 5; 10; 50; 100; 1000$ Па; $L = 5$ м; $d_z = 0,00376$ м; $m = 0,42$; $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с.

Сперва находим значения коэффициента проницаемости по формулам (5) – (9). Затем по формуле (3) определяем скорость ламинарного фильтрационного потока с учётом полученных значений k_ϕ соответственно и вышеуказанных исходных данных (табл. 4).

Таблица 4

Сравнение расчётных значений k_ϕ и v в скоплении зерна пшеницы

Коэффициент проницаемости $k_\phi, \text{м}^2$				
по Ч. Слихтеру (5)	по Эльдифрави (6)	по Козени (7)	по К. Терцаги (8)	по А.В. Лыкову (9)
$\varphi = 70^\circ$; $n = 0,1647$; $m = 0,3871$; $k_\phi = 6,5 \cdot 10^{-9} \text{м}^2$	$k_\phi = 11,1 \cdot 10^{-9} \text{м}^2$	$k_\phi = 26,0 \cdot 10^{-9} \text{м}^2$	$k_\phi = 3,77 \cdot 10^{-5} \text{м}^2$	$k_\phi = 41,2 \cdot 10^{-9} \text{м}^2$
Скорость ламинарного фильтрационного потока $v, \text{м/с}$, по формуле (3)				
$\Delta p = 0,5$ Па				
0,00004	0,00006	0,00014	0,21	0,00023
$\Delta p = 1$ Па				
0,00007	0,00012	0,00029	0,42	0,00046
$\Delta p = 5$ Па				
0,00036	0,00061	0,0014	2,08	0,0023
$\Delta p = 10$ Па				
0,00072	0,0012	0,0029	4,17	0,0046
$\Delta p = 50$ Па				
0,0036	0,0061	0,014	20,83	0,023
$\Delta p = 100$ Па				
0,0072	0,012	0,029	41,66	0,045
$\Delta p = 1000$ Па				
0,072	0,12	0,29	416,6	0,45

Показано существенное влияние перепада давления на скорость потока в скоплении. Наблюдается варьирование значений v в широком диапазоне при каждом значении Δp соответственно, поскольку расчётные значения проницаемости существенно отличаются друг от друга. В частности, формула К. Терцаги (8) даёт повышенное значение k_ϕ , превосходящее остальные на четыре порядка, поэтому трудно судить о корректности результатов теоретического исследования без знания действительной проницаемости

пористых сред. Интересно, что давление в пористой среде в реальных условиях может изменяться гораздо меньше чем на 10 Па, даже стремиться к нулю, однако и в этом случае возможно образование фильтрационного потока, как показывает практика хранения зерна.

Цель работы – усовершенствовать метод определения скорости ламинарного фильтрационного потока воздуха в межзерновом пространстве дисперсной среды с учётом действительной проницаемости.

Материалы и результаты исследований. Количественная зависимость между пористостью и проницаемостью была исследована для песчаников различного гранулометрического состава [3]. По экспериментальным данным [3], с помощью MS Excel (рис. 2) получены эмпирические зависимости для расчёта коэффициента проницаемости от пористости для сред с мелкозернистыми $d_z = 0,3...0,5$ мм (1-я формула) и крупнозернистыми частицами $d_z > 0,5$ мм (2-я формула) соответственно

$$\begin{cases} k_{\phi} = 8 \cdot 10^{-9} m^{5,6}; \\ k_{\phi} = 6 \cdot 10^{-8} m^6. \end{cases} \quad (10)$$

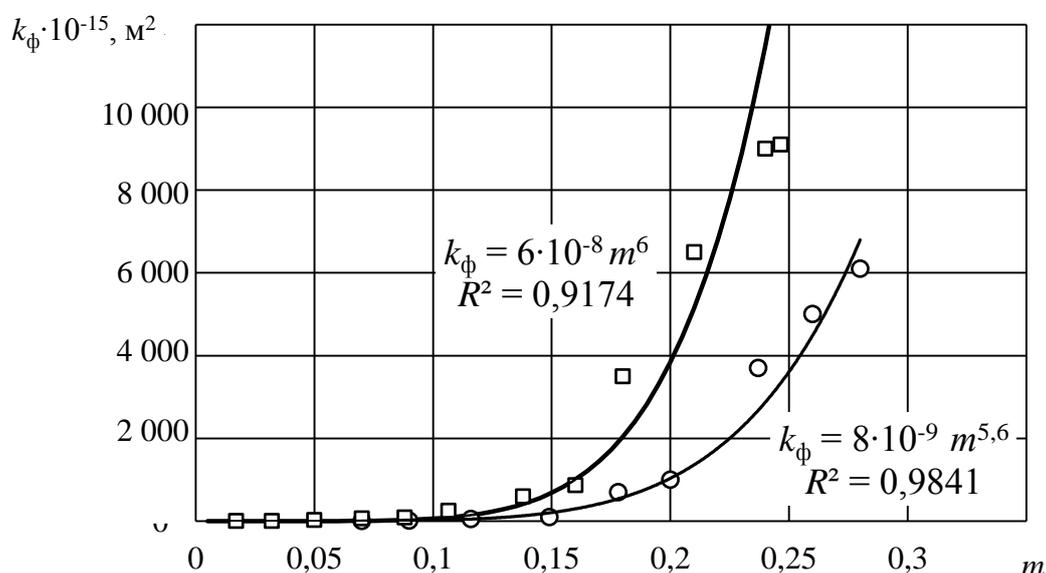


Рис. 2. Взаимосвязь между пористостью и проницаемостью для песчаника разной дисперсности:

○ – мелкозернистый песчаник; □ – крупнозернистый песчаник

Американскими учёными исследована проницаемость измельчённой горной породы в зависимости от пористости. При математической обработке экспериментальных данных получена эмпирическая зависимость проницаемости от пористости в виде

$$k_{\phi} = 6 \cdot 10^{-9} m^6, \quad (11)$$

которая согласуется с первой формулой системы (10). В уравнениях (10) и (11) пористость возводится примерно в одинаковую степень, но множитель перед пористостью меняется, очевидно, что проницаемость зависит не только от пористости, но и от эквивалентного диаметра вмещающих частиц.

По данным табл. 2, с помощью MS Excel (рис. 3) получена эмпирическая зависимость пористости от эквивалентного диаметра частиц различных сельскохозяйственных культур, применимая при $d_z \geq 0,0085$ м:

$$m = -9293d_z^2 + 175d_z - 0,0525. \quad (12)$$

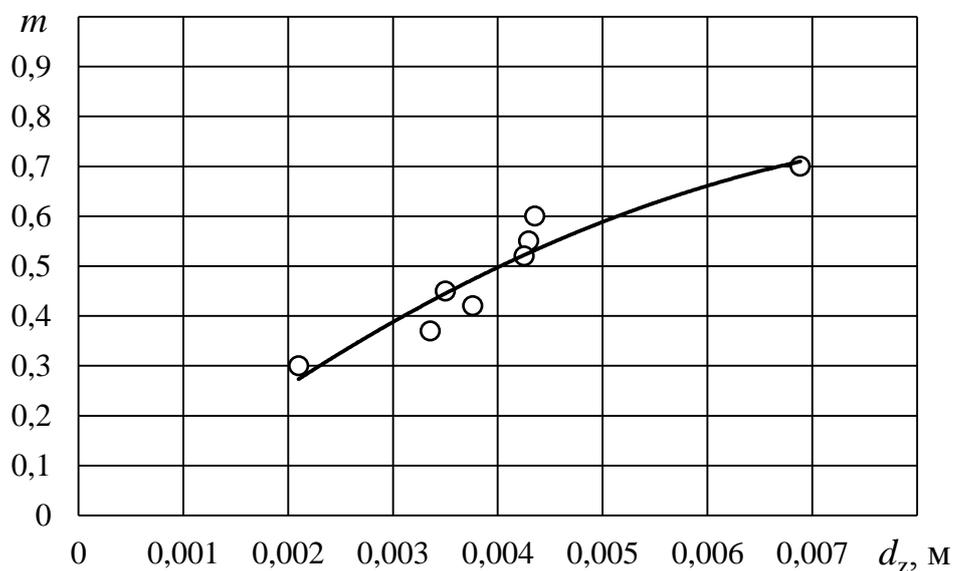


Рис. 3. Зависимость пористости от эквивалентного диаметра зерновых частиц

Проведём расчёт скорости ламинарного фильтрационного потока в насыпи зерна пшеницы с $d_z = 0,005$ м, используя полученные эмпирические зависимости (11) и (12) и исходные данные: $L = 5$ м; $\mu = 1,81 \cdot 10^{-5}$ Па·с (табл. 5).

Таблица 5

Расчётные значения v , м/с, в скоплении зерна пшеницы

m	$k_{\phi}, \text{ м}^2$	$\Delta p, \text{ Па}$						
		1	5	10	50	100	1000	2000
0,59	$2,53 \cdot 10^{-10}$	$2,8 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$2,8 \cdot 10^{-5}$	0,00014	0,00028	0,0028	0,0056

Коэффициент проницаемости, рассчитанный по эмпирической зависимости (11), меньше значений, представленных в табл. 3, за исключением формулы К. Терцаги, которая даёт аномально высокие значения. Поэтому и значения скорости ламинарного фильтрационного потока гораздо меньше по сравнению с результатами, полученными по аналитическим зависимостям (5) – (9).

Самовозгорание зерна может произойти лишь при определённом фильтрационном потоке воздуха, который для сельскохозяйственных культур равен 0,00166...0,015 м/с. При потоке менее 0,00166 м/с самовозгорание не произойдёт вследствие снижения концентрации кислорода по пути фильтрации и рассеивания теплоты в окружающую среду, а при потоке 0,015 м/с – из-за конвекции. Наиболее велика вероятность самовозгорания сельскохозяйственных культур при фильтрационном потоке 0,005...0,0066 м/с [1], именуемом пожароопасным.

Из табл. 5 видно, что пожароопасный фильтрационный поток в скоплении пшеницы $L = 5$ м может возникнуть при перепаде давления $\Delta p = 2000$ Па. На значение v также оказывает существенное влияние толщина пористой среды (рис. 4).

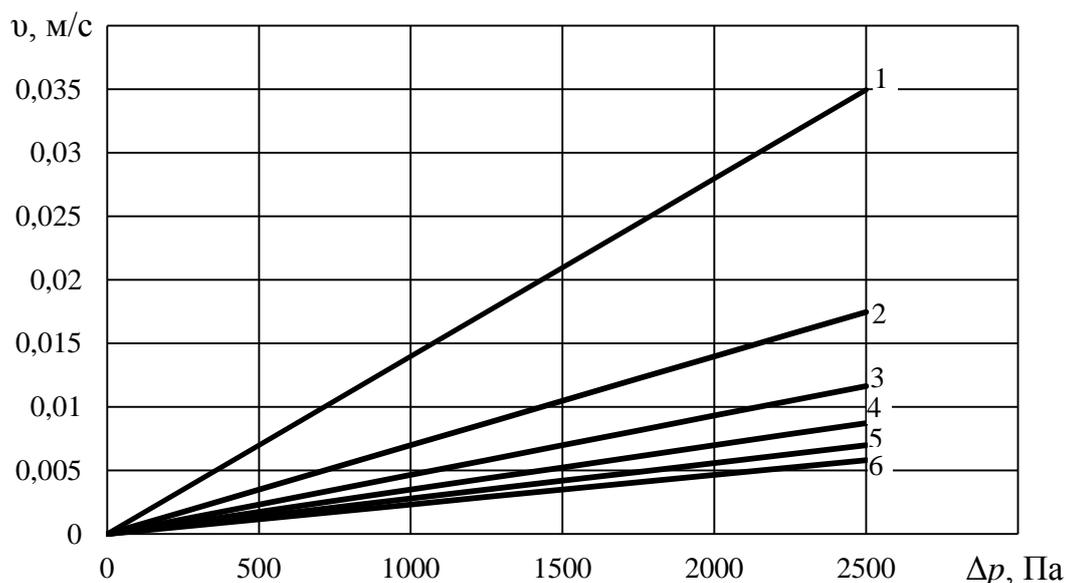


Рис. 4. Влияние толщины скопления зерна на скорость фильтрационного потока при различном перепаде давления:
1 – $L = 1$ м; 2 – $L = 2$ м; 3 – $L = 3$ м; 4 – $L = 4$ м; 5 – $L = 5$ м; 6 – $L = 6$ м

Установлено, что скорость фильтрационного потока уменьшается при увеличении толщины насыпи зерна. Анализ рис. 4 показывает, что при определённой толщине дисперсной среды на скорость фильтрационного потока будет оказывать влияние лишь перепад давления. Результаты выполненного

исследования согласуются с данными о фильтрации воздуха через угольное скопление [4], где также наблюдается закономерность в снижении скорости при увеличении толщины.

Вывод. Анализ предложенных ранее аналитических зависимостей для расчёта коэффициента проницаемости пористой среды показал, что полученные расчётные значения существенно отличаются друг от друга. Предложены эмпирические зависимости пористости и коэффициента проницаемости от эквивалентного диаметра частицы, необходимые для расчёта скорости по линейному закону фильтрации Дарси. Полученные результаты можно использовать для прогнозирования возникновения пожароопасного фильтрационного потока в скоплении сельскохозяйственных культур.

Список литературы / References

1. Цык, В.В. Послеуборочная обработка и хранение зерна / В.В. Цык. – Горки: БГСХА, 2014. – 268 с.

Tsyk, V.V. *Posleuborochnaya obrabotka i khraneniye zerna* [Postharvest treatment and grain storage]. Gorki, BGSKhA Publ., 2014, 268 p.

2. Процессы и аппараты химической технологии: в 2 кн. / В.Г. Айнштейн, М.К. Захаров, Г.А. Носов [и др.]; под ред. В.Г. Айнштейна. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2014. – 1758 с.

Ainshteyn, V.G., Zakharov, M.K., Nosov, G.A. etc. Ainshteyn, V.G., ed. *Protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii. Obshchiy kurs: v 2 kn.* [Processes and apparatuses of chemical technology. Guideline: in 2 books]. Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy Publ., 2014, 1758 p.

3. Петрофизика горных пород [Электронный ресурс]. URL: <https://edu.kpfu.ru/mod/book/tool/print/index.php?id=104049> (дата обращения: 29.01.2018).

Petrofizika gornykh porod [Petrophysics of rocks] (Electronic resource). <https://edu.kpfu.ru/mod/book/tool/print/index.php?id=104049> (accepted: 29.01.2018).

4. Греков, С.П. Расчёт пожаробезопасных скоростей фильтрации воздуха через угольное скопление / С.П. Греков, И.Н. Зинченко, Г.Б. Тында // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2006. – Вып. 43. – С. 24 – 29.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N., Tynda, G.B. *Raschyet pozharobezopasnykh skorostey fil'tratsii vozdukha cherez ugol'noye skopleniye* [Calculation of fire-safe velocities of air filtration through the coal accumulation]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2006, issue 43, pp. 24 – 29.

*Irina Gennadiyevna Starikova, Cand. Sci. (Tech.), academic secretary; e-mail: ir-starik@yandex.ru;
Igor Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: zinstar@mail.ru;
Kristina Valeriyevna Hlushenko, research associate; e-mail: kristina.hlushenko@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-81;
Aleksandr Aleksandrovich Podrukhin, scientific associate; e-mail: ifgpdnr@mail.ru
The Governmental Institution “Institute of Physics of Mining Processes”
283114, Donetsk, 72, R. Luxemburg st. Phone (+38 062) 381-17-85*

AIR FILTRATION IN THE GRANULAR VEGETABLE SUBSTANCE ACCUMULATION

Purpose. Improvement of the method of determination of the laminar air filtration flow velocity in the porous substance accumulation.

Methods. Mathematical treatment and analysis of literary data.

Results. It has been ascertained by the calculation of the filtration air flow in the interior of the wheat grain accumulation that the velocity depends on the thickness of the dispersive medium and permeability coefficient. The porosity that depends on the form and size of containing particles influences the permeability coefficient value. Using the geometrical characteristics of the particles of the porous medium one can determine the filtration flow velocity when formation of the thermal hyperactivity seat in the embankment of the substance.

Scientific novelty. The empirical dependences of the porosity on the equivalent diameter of the particle and permeability because of the porosity of the substance are proposed, though the last dependence is described according to the power law, what the investigators didn't taken into account earlier.

Practical value. One can apply the results obtained to forecast the formation of the fire-hazardous filtration flow in the substance accumulation.

Key words: *granular substance; porosity; permeability; laminar filtration flow; mathematical analyses.*

УДК 614.841.41:536.24

Кристина Валериевна Глушенко, мл. науч. сотр.; e-mail: kristina.hlushenko@mail.ru

Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-81

КИНЕТИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ТЕПЛОТДАЧИ ПРИ САМОНАГРЕВАНИИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА

Цель. Определить кинетические параметры процесса окисления и коэффициенты теплоотдачи древесных опилок по адиабатической скорости самонагревания и темпу охлаждения для дальнейшего прогнозирования условий их пожаровзрывобезопасного хранения.

Методика. Термографический метод установления склонности органических веществ к самовозгоранию; обработка и анализ экспериментальных данных.

Результаты. Определены коэффициент охлаждения, характеризующий условия теплоотвода самовозгорающейся массы; кинетические параметры процесса окисления древесных опилок; коэффициенты теплоотдачи для разного объёма исследуемого вещества.

Научная новизна. Неизотермическим методом с применением тепловой теории Я.С. Киселева исследована кинетика самовозгорания углеродного органического вещества (на примере древесных опилок). Установлено, что температурную зависимость адиабатической скорости самонагревания описывает экспоненциальное уравнение с постоянными для данного образца кинетическими параметрами.

Практическая значимость. Предложен метод определения кинетических параметров процесса окисления углеродных веществ в лабораторных условиях для качественной оценки их склонности к самовозгоранию.

Ключевые слова: органические вещества; самовозгорание; адиабатическая скорость самонагревания; темп охлаждения; энергия активации; предэкспоненциальный множитель; коэффициент теплоотдачи; критерий Био.

Постановка проблемы. Возникновение и развитие горения при самовозгорании твёрдых веществ в результате экзотермических процессов в скоплении пористого вещества. При наличии условий для накопления теплоты происходит самонагревание вещества, что приводит к интенсификации процессов его низкотемпературного окисления вплоть до возникновения горения. Прогнозирование возможности самовозгорания представляет собой важную проблему. Она может быть решена двумя способами: экспериментальным – определением показателя пожарной опасности данного вещества, расчётным – созданием расчётной модели развития самонагревания.

Анализ последних исследований. Основным процессом при самонагревании является взаимодействие кислорода с поверхностью пор твёрдого вещества, а также с газообразными продуктами его разложения. Поэтому большинство разработанных методов оценки склонности твёрдых веществ к самовозгоранию определяют активность вещества по отношению к кислороду с определением калориметрических, гравиметрических, термических

или волюмометрических показателей [1, 2]. Большинство из этих методов – сложны и дорогостоящи.

Усовершенствованный метод калориметрирования, разработанный Я.С. Киселевым, основан на исследовании кинетики тепловыделения по кривым «разогревание – время», и позволяет находить температурную зависимость адиабатической скорости самонагрева твердых веществ в широком интервале температур, выявлять характерные температурные точки при самовозгорании.

Показано [3 – 5], что температурное поле тел с внутренними источниками теплоты при распределении температур подобно температурному полю тел в стадии регулярного охлаждения. Вследствие этого теплоотвод от тел с равномерно распределёнными внутренними источниками теплоты при стационарном и квазистационарном состоянии с достаточной точностью можно описывать теми же формулами, что и при охлаждении инертных тел в стадии регулярного теплового режима (коэффициент теплоотдачи $\alpha \rightarrow \infty$), то есть принимать скорость охлаждения пропорциональной разности температур наиболее нагретой точки тела и окружающей среды, используя в качестве коэффициента пропорциональности темп охлаждения инертного тела.

Температурную зависимость адиабатической скорости самонагрева P_t^+ , К/с, определяют [6] по формуле

$$P_t^+ = C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \quad (1)$$

где C – предэкспоненциальный множитель, К/с;

E – энергия активации процесса самовозгорания, Дж/моль;

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

T – температура, К.

Адиабатическую скорость охлаждения P^- , К/с, определяют [6] по формуле

$$P^- = \Pi_0 \Delta T, \quad (2)$$

где Π_0 – коэффициент охлаждения, с^{-1} (мин^{-1});

ΔT – разность температур наиболее нагретого элемента вещества в скоплении и окружающей среде, К.

Коэффициент Π_0 определяют по формуле [6]

$$\Pi_0 = \frac{\psi \alpha F}{c_p \rho V}, \quad (3)$$

где ψ – критерий неравномерности нагревания;
 α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К);
 c_p – удельная теплоёмкость вещества, Дж/(кг·К);
 ρ – плотность вещества, кг/м³;
 F – внешняя поверхность скопления, м²;
 V – объём скопления, м³.

Критерий неравномерности нагревания определяют по формуле [6]

$$\psi = \frac{n\lambda}{\alpha R_x + n\lambda}, \quad (4)$$

где n – относительный градиент на теплообменной поверхности, равный:
 2,38 – плоскость; 2,71 – неограниченный цилиндр; 3,01 – сфера;
 2,29 – куб; 2,50 – конечный цилиндр;
 λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К);
 R_x – определяющий размер (расстояние от поверхности вещества до теплофизического центра), м.

Цель исследования. Расчёт кинетических параметров процесса окисления и коэффициентов теплоотдачи древесных опилок по адиабатической скорости самонагрева и темпу охлаждения для дальнейшего прогнозирования условий их пожаровзрывобезопасного хранения.

Материалы и результаты исследований. Экспериментальная установка, используемая при термографическом методе для исследования критических условий самовозгорания твёрдых дисперсных веществ, состоит из термостата, реакционных сосудов (корзиночек), термоэлектрических преобразователей, присоединённых к термостату, регулирующего и регистрирующего приборов [7].

Термостат, приспособленный для изучения кинетики тепловыделения углеродных веществ, позволяет вносить корзинку с испытуемым образцом и надёжно её устанавливать, поддерживать температуру в реакционном объёме с точностью $\pm 0,5$ К в пределах 0...1073 К. Потенциометр КСП-2 применяют для регистрации изменения температуры внутри корзинки при самовозгорании вещества с помощью термоэлектрических преобразователей. Реакционные сосуды представляют собой корзиночки кубической формы, без крышек, с размером ребра куба l , равным 35, 50 и 75 мм.

Коэффициент охлаждения определяли экспериментально, путём измерения замедления скорости охлаждения предварительно нагретого до температуры самовозгорания образца вещества.

Массу дисперсного вещества m , кг, необходимого для заполнения корзиночки, рассчитывали по формуле

$$m = \rho V, \quad (5)$$

где ρ – насыпная плотность опилок, в условиях опыта равная 145...180 кг/м³;

V – объём корзинки, м³.

Затем полученную массу вещества для каждого размера корзинки выдерживали при заданной температуре для определения темпов охлаждения и критических температур самовозгорания. За температуру самовозгорания T_c , К, образца принимали минимальную температуру термостата T_t , К, при которой наблюдалось повышение температуры внутри корзинки на 100 К, а при температуре меньше на 10 К – скачка не наблюдалось.

На КСП-2 фиксировали характер кривых самонагрева и охлаждения материала до начальной температуры термостата. Кривая охлаждения образца древесных опилок с размером ребра куба 50 мм, представленная на рис. 1, соответствует уравнению

$$\Delta T = \Delta T_{\text{нач}} \exp(-\Pi_0 \tau), \quad (6)$$

где ΔT – разность температур материала в центре корзинки и термостатируемого воздуха в момент времени τ , К;

$\Delta T_{\text{нач}}$ – разность температур в момент, принятый за начальный ($\tau = 0$), К;

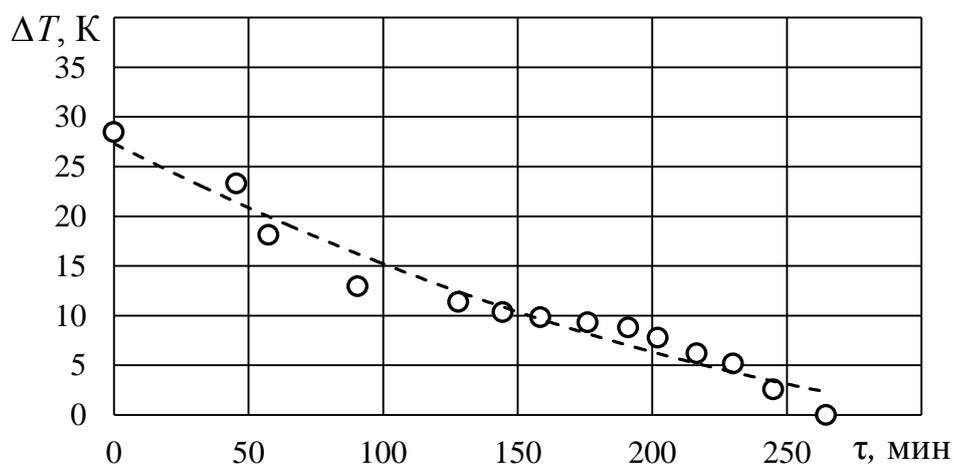


Рис. 1. Изменение температуры вещества:

$$l = 50 \text{ мм}; m = 18,87 \text{ г}; T_t = 488 \text{ К}$$

Для определения значения коэффициента охлаждения строили график в системе координат $\ln \Delta T = f(\tau)$ (рис. 2), представляющий прямую линию

$$\ln \Delta T = \ln \Delta T_{\text{нач}} - \Pi_0 \tau. \quad (7)$$

Угловой коэффициент прямой равен коэффициенту охлаждения. Его значение определяли методом наименьших квадратов в MS Excel и получили $\Pi_0 = 0,007 \text{ мин}^{-1}$.

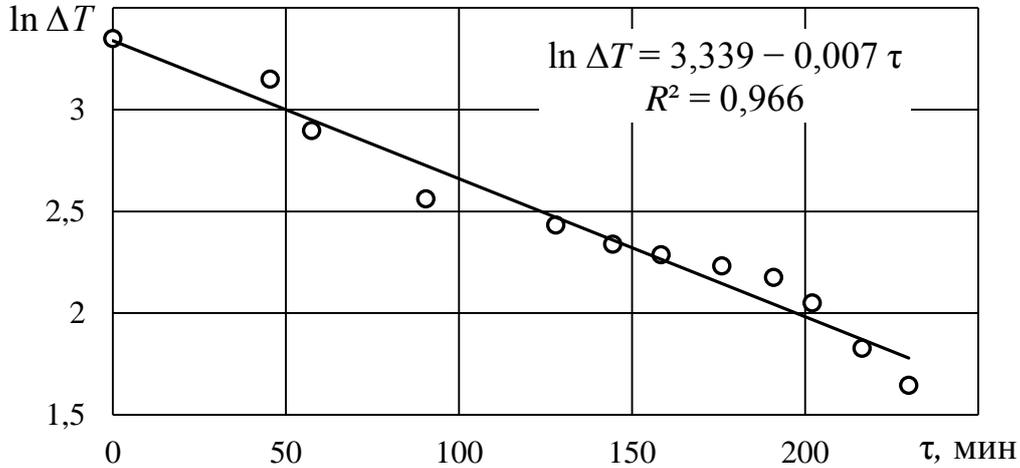


Рис. 2. Изменение температуры вещества в логарифмических координатах:
 $l = 50 \text{ мм}; m = 18,87 \text{ г}; T_{\tau} = 488 \text{ К}; \Pi_0 = 0,007 \text{ мин}^{-1}$

Эффективную энергию активации E , кДж/моль, и предэкспонент адиабатической скорости самонагрева C , К/мин (К/с), определяли по температурным зависимостям максимальных адиабатических скоростей самонагрева.

Порядок определения E и C состоял в том, что логарифмировали выражение (8), полученное из уравнений (1) и (2) [8]:

$$C \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) = \Pi_0 \Delta T; \quad (8)$$

$$\ln P_t^+ = \ln(\Pi_0 \Delta T) = \ln C - \frac{E}{R} \frac{1}{T}. \quad (9)$$

Угловой коэффициент прямой, описанной уравнением (9), равен $a_1 = E/R$, а свободный член $a_0 = \ln C$ (рис. 3). Значения коэффициентов определяли методом наименьших квадратов в MS Excel. По значению коэффициентов рассчитывали значения кинетических параметров $E = a_1 R$ и $C = \exp(a_0)$.

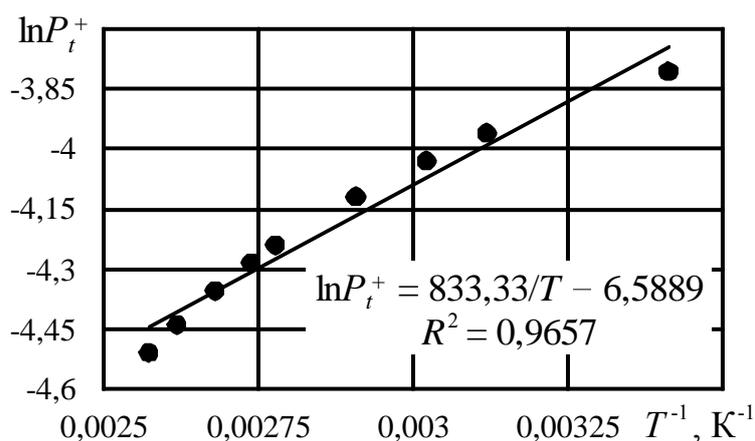


Рис. 3. Зависимость $\ln P_t^+$ от T^{-1} для образца древесных опилок:

$$l = 75 \text{ мм}; m = 61,5 \text{ г}; T_T = T_c = 483 \text{ К}; \Pi_0 = 0,0001167 \text{ с}^{-1}$$

Полученные в ходе лабораторных исследований данные кинетических параметров сведены в табл. 1.

Таблица 1

Кинетические параметры для древесных опилок

Размер ребра куба l , м	Масса вещества m , кг	T_T , К	T_c , К	E , Дж/моль	$E_{\text{ср}}$, Дж/моль	C , К/с	$C_{\text{ср}}$, К/с
0,035	0,0076	503	513	6711	6944	613	703
		513		6902		609	
0,05	0,0189	488	498	6836		700	
		498		7175		736	
0,075	0,0615	473	483	7113		833	
		483		6928		727	

Установленные экспериментальные данные хорошо согласуются с современным представлением о самовозгорании дисперсных углеродных веществ растительного происхождения [6]. Известно, что чем меньшим значением E и большим значением C обладает материал, тем более он склонен к самовозгоранию. Для древесных опилок данные экспериментов показывают низкие значения энергии активации и предэкспоненциального множителя. Также показано, что энергия активации практически не зависит от температуры, что не противоречит законам химической кинетики.

Для расчёта коэффициента теплоотдачи в слое древесных опилок и критерия Био в качестве исходных данных использовали коэффициент охлаждения $\Pi_0 = 0,007 \text{ мин}^{-1} = 0,0001167 \text{ с}^{-1}$ и теплофизические свойства материала: $c_p = 1200 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $\rho \approx 162,5 \text{ кг}/\text{м}^3$; $\lambda = 0,054 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$.

Подставим формулу (4) в (3):

$$\Pi_0 = \frac{\left(\frac{n\lambda}{\alpha R_x + n\lambda} \right) \alpha F}{c_p \rho V}$$

и выведем уравнение для определения коэффициента теплоотдачи

$$\alpha = \frac{\Pi_0 c_p \rho V n \lambda}{n \lambda F - \Pi_0 c_p \rho V R_x}. \quad (10)$$

Критерий Био рассчитывают по формуле

$$Bi = \frac{\alpha}{\lambda} R_x.$$

В табл. 2 приведены рассчитанные по формуле (10) значения коэффициента теплоотдачи для опилок разного объёма и значения критерия Био.

Таблица 2

Значения коэффициента теплоотдачи и критерия Био для образцов древесных опилок разного объёма

Размер ребра куба l , м	$R_x = l/2$, м	$F = l^2$, м ²	$V = l^3$, м ³	α , Вт/(м ² ·К)	Bi
0,035	0,0175	0,001225	0,000042875	0,898	0,291
0,05	0,025	0,0025	0,000125	1,478	0,684
0,075	0,0375	0,005625	0,000421875	3,538	2,457

Показано (см. табл. 2), что с ростом радиуса насыпи возрастает коэффициент теплоотдачи с окружающей средой и критерий Био, что согласуется с тепловой теорией Я.С. Киселева (при охлаждении инертных тел в стадии регулярного теплового режима $\alpha \rightarrow \infty$). При этом с ростом R_x температура самовозгорания образца материала уменьшается (табл. 1), что объясняется аккумуляцией теплоты в образце большего размера и, следовательно, самоускорением окислительных процессов в слое древесных опилок.

Обнаруженная закономерность в соотношении между коэффициентами теплоотдачи, объёмом образца, температурой самовозгорания и кинетическими параметрами процесса окисления имеет существенное значение для прогноза и

профилактики пожарной опасности хранения углеродных органических веществ и позволит в дальнейшем определять пожаробезопасные условия хранения растительного сырья в штабелях.

Выводы. Неизотермическим методом с применением тепловой теории Я.С. Киселева исследована кинетика самовозгорания древесных опилок. Полученное низкое значение энергии активации свидетельствует о высокой реакционной активности материала, однако низкое значение предэкспоненциального множителя может указывать на то, что при иницировании процесса самовозгорания первостепенная роль отводится материалу в нагретом состоянии. Рассчитанные кинетические параметры процесса окисления древесных опилок можно применять при разработке технических рекомендаций, направленных на снижение пожарной опасности при хранении скоплений углеродных материалов, находящихся в штабеле.

Список литературы / References

1. Саранчук, В.И. Окисление и самовозгорание твердого топлива / В.И. Саранчук, Д.В. Русчев, В.К. Семененко. – Киев: Наукова думка, 1994. – 264 с.

Saranchuk, V.I., Ruschev, D.V., Semenenko, V.K. *Okisleniye i samovozgoraniye tvyerdogo topliva* [Oxidation and spontaneous combustion of the solid fuel]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1994, 264 p.

2. Тепловые эффекты процесса пиролиза углей / В.И. Саранчук, В.В. Ошовский, В.Ф. Горюшин, Ю.В. Никитенко // Углехимический журнал. – 2002. – № 5 – 6. – С. 15 – 19.

Saranchuk, V.I., Oshovskiy, V.V., Goryushin, V.F., Nikitenko, Yu.V. *Teplovyeye efekty protsesssa piroliza ugley* [Thermal effects of the process of pyrolysis of coals]. *Uglekhimicheskiy zhurnal – Coal chemical journal*, 2002, no. 5 – 6, pp. 15 – 19.

3. Корольченко, И.А. Сравнение результатов расчета условий теплового самовозгорания по различным методическим подходам / И.А. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 1. – С. 8 – 14.

Korol'chenko, I.A. *Sravneniye rezul'tatov raschyeta usloviy teplovogo samovozgoraniya po razlichnym metodicheskim podkhodam* [Comparison of results of calculation of the heat spontaneous combustion conditions according to various methodical approaches]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2004, no. 1, pp. 8 – 14.

4. Шебеко, Ю.Н. Анализ условий теплового самовозгорания хлопка при транспортировании и хранении в прессованных кипах / Ю.Н. Шебеко, В.И. Горшков, И.А. Корольченко // Пожаровзрывобезопасность. – 2002. – № 2. – С. 41 – 46.

Shebeko, Yu.N., Gorshkov, V.I., Korol'chenko, I.A. *Analiz usloviy teplovogo samovozgoraniya khlopka pri transportirovani i khraneni v pressovannykh kipakh* [Analysis of conditions of the thermal spontaneous combustion of cotton when transportation and storage in bales compressed]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2002, no. 2, pp. 41–46.

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

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

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

Belyak, A.L. *Snizheniye endogennoy pozharoопасnosti malometamorfizirovannogo kamennogo uglya i polukoksa pri khraneni: dis. ...kand. tekhn. nauk: 05.26.03* [Decrease of the spontaneous fire hazard of brown coal and semi-coke when storage: cand. tech. sci. diss.: 05.05.15]. Irkutsk; Kemerovo, 2004, 109 p.

7. Орликова, В.П. Реакционная активность органических веществ / В.П. Орликова, К.В. Глушенко, В.В. Волынец // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 4 (53). – С. 58 – 68.

Orlikova, V.P., Hlushenko, K.V., Volynets, V.V. *Reaktsionnaya aktivnost' organicheskikh veshchestv* [Reaction activity of organic substances]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 4 (53), pp. 58 – 68.

8. Тимофеева, С.С. Пожарная безопасность технологических процессов: учебно-методическое пособие по курсовому проектированию / С.С.Тимофеева, А.В. Корнилов, В.В. Малов.– Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – 42 с.

Timofeyeva, S.S., Kornilov, A.V., Malov, V.V. *Pozharnaya bezopasnost' tekhnologicheskikh protsessov: uchebno-metodicheskoye posobiye po kursovomu proyektirovaniyu* [Fire safety of technologic processes: educational and methodological manual on directional projecting]. Irkutsk, IrGTU Publ., 2014, 42 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук П.С. Пашковским.
Дата поступления рукописи 25.04.2017

Kristina Valeryevna Hlushenko, research associate; e-mail: kristina.hlushenko@mail.ru

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-81

KINETIC PARAMETERS AND HEAT-TRANSFER COEFFICIENTS BY THE SPONTANEOUS HEATING OF AN ORGANIC SUBSTANCE

Purpose. To determine kinetic parameters of the oxidation process and heat-transfer coefficients of sawdust on the adiabatic sound velocity of the spontaneous heating and rate of cooling for further prognostication of conditions of their fire- and explosion-safe storage.

Methods. Thermographic method of establishment of liability of the organic substances to spontaneous combustion; processing and analysis of experimental data.

Results. The coefficient of cooling characterizing the conditions of heat sink of the mass being self-combustible; kinetic parameters of the process of the sawdust oxidation; heat-transfer coefficients for the various volume of the substance being investigated have been determined.

Scientific novelty. The kinetics of the spontaneous combustion of the carbon organic substance was investigated (in terms of sawdust) with the non-isothermal method using the Ya.S. Kiselyov heat theory. It is established that the exponential equation with the kinetic parameters that are constant for the specimen given describes the temperature dependence of the adiabatic sound velocity of the spontaneous heating.

Practical value. The method of determination of the kinetic parameters of the process of oxidation of the carbon substances under laboratory conditions is proposed for the qualitative estimation of their liability to spontaneous combustion.

Keywords: *organic substances; spontaneous combustion; adiabatic sound velocity of the spontaneous heating; rate of cooling; activation energy; pre-exponential factor; heat exchange coefficient; Bio criterion.*

УДК 543.544.3 : [547.21+547.53]

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

Виктория Валентиновна Лебедева, ст. науч. сотр.; e-mail: lebedenish@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артёма, 157. Тел. (+38062) 332-78-55*

ОБНАРУЖЕНИЕ И ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОСТАТКОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ ПОСЛЕ ПОЖАРОВ

Цель. Разработка газохроматографического метода обнаружения легковоспламеняющихся нефтепродуктов в пробах, отобранных с места пожара, и их идентификации, который отличаются простотой в исполнении и экспрессностью, высокая чувствительность. Установление главных критериев идентификации легковоспламеняющихся нефтепродуктов (бензина и керосина).

Методика. Исследования с использованием газожидкостной и газоадсорбционной хроматографии.

Результаты. Разработан доступный, экспрессный и высокочувствительный метод аккумулятивной газовой хроматографии обнаружения и идентификации нефтепродуктов (бензина и керосина) в пробах, отобранных с места пожара, отличающийся низким порогом обнаружения (на уровне наноконцентраций) бензина $5,9 \cdot 10^{-11}$ г/см³ и керосина $5,0 \cdot 10^{-11}$ г/см³. Установлены основные критерии идентификации бензина и керосина: время удерживания группового пика и отпечаток групповой хроматограммы (аналогично отпечатку пальцев).

Научная новизна. Разработан новый метод газовой хроматографии, который позволяет обнаружить и идентифицировать легковоспламеняющиеся сложные смеси нефтяной природы без предварительной экстракции и концентрирования проб. В основу метода положен принцип, который отличается от классической хроматографии не делением исходной сложной смеси на отдельные компоненты, а, наоборот, суммированием сигналов компонентов в единый групповой сигнал.

Практическая значимость. Метод позволяет исключить применение недостаточно селективных, сложных, затратных и продолжительных по времени спектрометрических и традиционных хроматографических методов при исследовании причин возникновения пожаров.

Ключевые слова: аккумулятивная хроматография; пожарно-технические исследования; идентификация; бензин; керосин; сорбент; порог обнаружения; время удерживания; отпечаток групповой хроматограммы.

Постановка проблемы. В настоящее время уделяется большое внимание вопросам анализа нефтепродуктов при проведении расследований предполагаемого их использования в качестве инициаторов горения. Связано это с тем, что товарные нефтепродукты (бензин, керосин, дизельное топливо и др.) остаются наиболее распространёнными средствами, применяемыми злоумышленниками при поджогах. В связи с этим не снижается актуальность разработки и совершенствования методик пожарно-технических исследований, связанных с обнаружением следов нефтепродуктов и последующей их идентификацией в пробах, отобранных на месте пожара.

Пробы, отобранные после пожара, представляют собой сложный специфический объект пожарно-технических исследований. К специфике объектов можно отнести то, что они являются веществами неизвестной природы,

зачастую представленными в наноконцентрациях (менее 10^{-9} г/см³) на различных предметах-носителях: мебель, одежда, строительные материалы, тара и др.

Указанные особенности объектов исследований обуславливают необходимость проведения предварительных этапов подготовки проб к анализу: извлечение инициатора горения с последующим концентрированием. Извлечение остатков инициаторов горения из объектов-носителей в основном проводят методом жидкостной экстракции, реже применяют газовую проточную и ультразвуковую экстракции.

В процессе экстракции в анализируемую пробу приносят сопутствующие побочные компоненты неизвестного происхождения из объекта-носителя, не связанные с пожаром, и многочисленные примеси, содержащиеся в органических растворителях – при проведении жидкостной экстракции, а также в газе-носителе и сорбентах – при газовой экстракции, что приводит к искажению результатов идентификации инициаторов горения. Кроме того, подготовка проб к анализу занимает продолжительное время и увеличивает сроки пожарно-технических исследований.

Анализ последних исследований. В настоящее время в пожарно-технических исследованиях для обнаружения и идентификации остатков инициаторов горения в пробах, отобранных с места пожара, применяют в основном флуоресцентную и инфракрасную спектроскопии, газовую и тонкослойную хроматографии [1-4].

Однако методы флуоресцентной, инфракрасной спектроскопии и тонкослойной хроматографии устанавливают только классы органических соединений, с их помощью невозможно разделить на индивидуальные компоненты сложные смеси с одинаковым углеводородным составом и близкими свойствами, как, например, бензин и керосин.

Кроме этого, к недостаткам спектрометрических методов и хроматографии в тонком слое можно отнести необходимость проведения дополнительных этапов подготовки проб – экстракцию и концентрирование, что неизбежно ведёт к потере легколетучих компонентов инициаторов горения, находящихся в следовых количествах.

Выводы, сделанные на основе флуоресцентной, инфракрасной спектроскопии и тонкослойной хроматографии, можно считать предварительными. Основной причиной формирования таких выводов является неполный объём информации, связанный с недостаточной селективностью применяемых методов. В рассматриваемом вопросе традиционная газовая хроматография также себя исчерпала из-за недостаточной чувствительности. Устранить данную проблему можно только при наличии метода, чувствительность которого на несколько порядков выше относительно применяющихся в настоящее время спектрометрических и традиционных хроматографических методов.

Цель исследования – разработка метода обнаружения светлых нефтепродуктов, находящихся в следовых концентрациях, ниже 10^{-9} г/см³, и их идентификации в пробах, отобранных после пожара.

Материалы и результаты исследований. В основу разработанного метода положен принцип нетрадиционной хроматографии, который отличается от классической не делением исходной сложной смеси на отдельные компоненты, а, наоборот, суммированием сигналов компонентов в единый групповой сигнал. Этот метод хроматографии назван аккумулятивным.

Метод аккумулятивной хроматографии основан на движении анализируемой пробы вдоль слоя сорбента в потоке газа-носителя, где происходит суммирование летучих алифатических углеводородов в виде группового сигнала детектора за счёт примерно равного межфазного массового обмена на неполярном сорбенте.

Аккумулятивная хроматография предназначена для обнаружения остатков горючих жидкостей, представляющих собой сложные многокомпонентные смеси, при пожарно-технических исследованиях. К таким жидкостям относятся бензин, на долю которого приходится более 70 % всех случаев поджогов, и керосин – сложные смеси, состоящие из алифатических и ароматических углеводородов в разных концентрациях. Исходя из особенностей углеводородного состава бензина и керосина формирование группового пика для этих веществ можно получить за счёт избирательного концентрирования сорбентом алифатических углеводородов и тем самым повысить чувствительность метода.

Помимо обнаружения следов бензина и керосина, важным этапом разработки метода являлось установление главных критериев достоверной идентификации этих инициаторов горения. В данной работе главными критериями идентификации принято время удерживания группового пика и отпечаток групповой хроматограммы, подобно отпечатку пальцев. Для получения отпечатка групповой хроматограммы исходя из группового состава бензина и керосина необходимо разработать сорбент, который позволит избирательно концентрировать алифатические углеводороды и отделить их от ароматических для получения хроматографических «отпечатков пальцев».

В хроматографической системе обеспечить избирательное концентрирование алифатических углеводородов и отделение их от ароматических можно путём применения сорбента, на котором межфазный массообмен является примерно равным для группы алифатических и отдельно – для группы ароматических углеводородов.

Для решения поставленных задач проведена серия экспериментальных исследований с адсорбентами, отличающимися пористостью и удельной поверхностью: пористое стекло, стеклянный бисер и кварцевое стекло, а также инертными твёрдыми носителями с жидкими фазами различной полярности.

Поставленные задачи удовлетворяет вещество в неполярной жидкой фазе на инертном. Так, основной критерий идентификации – время удерживания

групповых пиков бензина и керосина, полученных на одной хроматографической колонке, отличается на 12 с (рис. 1, 2).

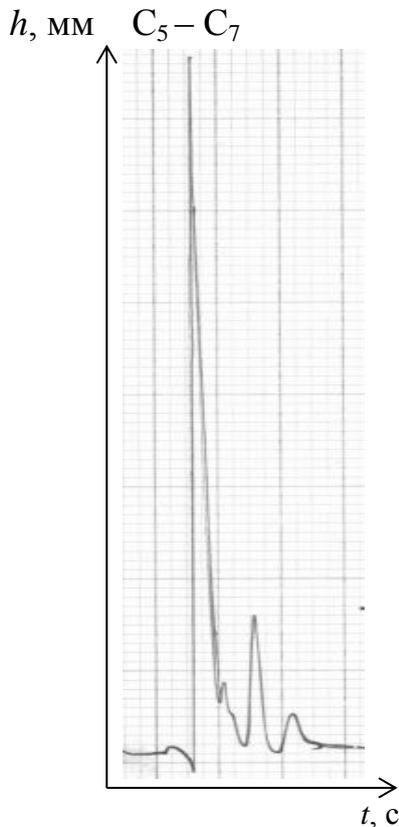


Рис. 1. Отпечаток групповой хроматограммы бензина:
 h – высота пика; t – время

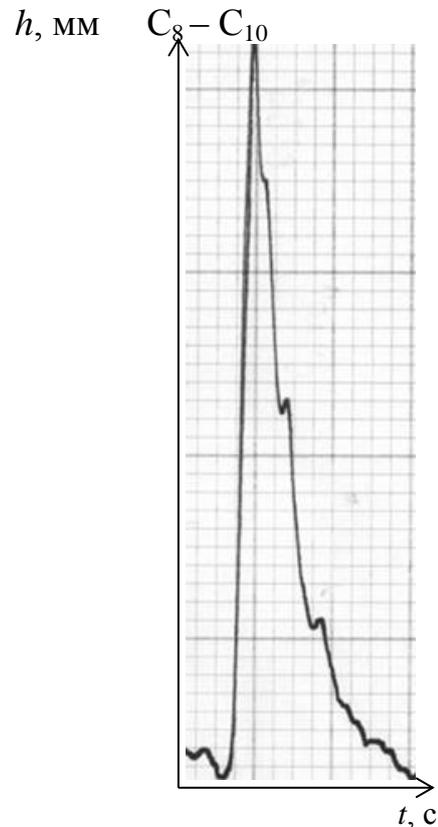


Рис. 2. Отпечаток групповой хроматограммы керосина

Выводы

1. Разработан новый метод хроматографии, названный аккумулятивным, отличающийся доступностью, экспрессностью и высокой чувствительностью обнаружения остатков бензина ($5,9 \cdot 10^{-11}$ г/см³) и керосина ($5,0 \cdot 10^{-11}$ г/см³).

2. Метод аккумулятивной хроматографии не требует предварительной экстракции, что исключает промежуточные стадии подготовки проб, с которыми связано наибольшее количество возможных погрешностей, искажающих результаты анализа и последующей идентификации.

3. Установлены критерии идентификации бензина и керосина: время удерживания группового пика и отпечаток групповой хроматограммы (аналогично отпечатку пальцев).

4. Метод аккумулятивной газовой хроматографии апробирован на реальных образцах, отобранных с мест пожаров, которые произошли на территории Донецкой области.

Список литературы / References

1. Сравнительный анализ методов исследования следов нефтепродуктов при проведении пожарно-технических экспертиз и мониторинге чрезвычайных ситуаций / П.Н. Егорилов, С.Н. Рубилов, Э.А. Ожегов, С.В. Шарапов // Надзорная деятельность и судебная экспертиза в системе безопасности. – 2013. – Т. 3, № 2. – С. 25 – 32.

Yegorikov, P.N., Rubilov, S.N., Ozhegov, E.A., Sharapov, S.V. *Sravnitel'nyy analiz metodov issledovaniya sledov nefteproduktov pri provedenii pozharno-tekhnicheskikh ekspertiz i monitoringe chrezvychaynykh situatsiy* [The comparative analysis of the methods of investigations of traces of oil products by carrying-out the fire-technological expert examinations and monitoring of emergencies]. *Nadzornaya deyatel'nost' i sudebnaya ekspertiza v sisteme bezopasnosti – Supervision activity and court expertise in the security system*, 2013, vol. 3, no. 2, pp. 25 – 32.

2. Шарапов, С.В. Экспертная диагностика остатков легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, изымаемых с места пожара, и критерии их классификации: дис. ...канд. техн. наук: 05.26.03 / Сергей Владимирович Шарапов. – СПб., 2000. – 149 с.

Sharapov, S.V. *Ekspertnaya diagnostika ostatkov legkovosplamenyayushchikhsya i goryuchikh zhidkostey, izymayemykh s mesta pozhara, i kriterii ikh klassifikatsii: dis. ... kand. tekhn. nauk : 05.26.03* [The expert diagnostics of rests of the flammable and combustible liquids taken away from a fire-place and criteria of their classification: cand. tech. sci. diss.: 05.26.03]. Sergey Vladimirovich Sharapov. – Saint Petersburg, 2000, 149 p.

3. Темердашев, З.А. Исследование и анализ бензинов, изменённых в процессе испарения и выгорания / З.А. Темердашев, И.А. Колычев // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2008. – Т. 74, № 4. – С. 4 – 8.

Temerdashev, Z.A., Kolychev, I.A. *Issledovaniye i analiz benzinov, izmenyennykh v protsesse ispareniya i vygoraniya* [Examination and analysis of benzenes changed in the process of evaporation and burning]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov – Factory laboratory. Diagnostics of materials*, 2008, vol. 74, no. 4, pp. 4 – 8.

4. Галишев, М.А. Экспертная диагностика инородных горючих жидкостей – инициаторов горения в автотранспортных средствах и объектах городской среды / М.А. Галишев, С.В. Шарапов, С.В. Тарасов // Пожаровзрывобезопасность. – 2004. – № 4. – С. 17 – 24.

Galishev, M.A., Sharapov, S.V., Tarasov, S.V. *Ekspertnaya diagnostika inorodnykh goryuchikh zhidkostey – initsiatorov goreniya v avtotransportnykh sredstvakh i ob'yektakh gorodskoy sredy* [The expert diagnostics of the heterogeneous combustible liquids – combustion initiators in vehicles and urban environment objects]. *Pozharovzryvobezopasnost' – Fire and explosion safety*, 2004, no. 4, pp. 17 – 24.

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

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

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

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

DETECTION AND IDENTIFICATION OF OIL PRODUCTS RESIDUA AFTER FIRES

Purpose. Working-out the gas chromatographic method of detection of highly inflammable oil products in the samples taken away from the fire-place and of their identification, the distinctive characteristic of which is a combination of implementation simplicity and dispatch of carrying-out the analysis with high sensitivity. Establishment of principal criteria of identification of the highly inflammable oil products (benzene and kerosene).

Methods. Investigations with the use of the gas-liquid and gas adsorption chromatography.

Results. The accessible, express and highly sensitive method of the accumulative gas chromatography of detection and identification of the oil products (benzene and kerosene) in the samples taken away from the fire-place has been worked out. It distinguishes itself by the low detection threshold (up to standard of nanoconcentrations) of benzene $5.9 \cdot 10^{-11} \text{ g/cm}^3$ and kerosene $5.0 \cdot 10^{-11} \text{ g/cm}^3$. The main criteria of identification of benzene and kerosene have been established: hold time of the group peak and imprint of the group chromatogram (similarly to finger-print).

Scientific novelty. The new method of the gas chromatography has been worked out. It allows detecting and identifying the highly inflammable complex mixtures of oil nature without preliminary extraction and concentration of the samples. The method is based on the principle that distinguishes itself from the classic chromatography not by dividing the initial complex mixture into the separate components, but on the contrary by summation of the signals of components to the united group signal.

Practical value. The method permits to rule out the application of the not enough selective, complicated, cost-based and time-long spectrometric and traditional chromatographic methods by investigation of causes of origin of the fires.

Keywords: *accumulative chromatography; fire-technological investigations; identification; benzene; kerosene; sorbate; detection threshold; hold time; imprint of the group chromatogram.*

УДК 614.8”363”

Екатерина Викторовна Бабенко, канд. техн. наук, науч. сотр.; e-mail: papyrus@list.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-44*

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРА

Цель. Анализ методов, возможностей и перспектив, позволяющих достоверно прогнозировать техногенные катастрофы.

Методика. Систематический обзор классификации, фактов, последствий и тенденций, связанных с чрезвычайными ситуациями техногенного характера в современном мире.

Результаты. Определены основные задачи прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Научная новизна. Перечислены перспективы использования предвестников чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Практическая значимость. Определена возможность получить, обработать и использовать информацию о предполагаемом процессе для экспериментального исследования при помощи компьютерного моделирования. Документально-инструментальная регистрация физических предвестников техногенных катастроф с последующим изучением и обработкой дает возможность прогнозировать техногенные катастрофы и принимать предупреждающие меры.

Ключевые слова: *техногенная катастрофа; классификация; авария; опасные вещества; предвестники; мониторинг; прогнозирование.*

Постановка проблемы. Существующий уровень развития науки, техники и производства непосредственным образом создает угрозу отдельным странам и всему человечеству в целом. Современное общество все в большей мере сталкивается с проблемой обеспечения техногенной безопасности. Промышленность, сконцентрировавшая в себе колоссальные запасы различных видов энергии, вредных веществ и материалов, при возникновении различного рода чрезвычайных ситуаций: происшествий, аварий и катастроф – стала постоянным источником серьезных угроз массовой гибели людей и нарушения состояния экосистем. Хотя прогресс человечества и невозможен без создания и освоения новых технологий, но внедрение в производство их всё новых и новых видов зачастую не только не снижает уровень потенциальной опасности, но и влечет появление качественно иных угроз и рисков. Использование все более сложной и энергоемкой техники неизбежно приводит к сбоям и просчетам в её производстве и использовании, если ей не уделять серьезного внимания.

Анализ последних исследований и публикаций. Ранее считалось, что техногенные катастрофы являются непредвиденными, поэтому их относили на счет случая, неблагоприятных обстоятельств, человеческого фактора и т.п. В настоящее время в отношении опасностей, обусловленных человеческой

деятельностью, вырабатывается другой подход: многие из них предсказуемы, могут быть смоделированы и максимально предотвращены с помощью соответствующих упреждающих мер. Существующая методология и практика обеспечения надежности и безопасности сложных человеко-машинных систем позволяют во многих случаях успешно решать такие задачи.

Согласно оценкам, 10...15 % техногенных катастроф располагают своими физически измеримыми предвестниками, которые могут быть использованы для прогнозирования наступления таких событий и предотвращения их неблагоприятных последствий. Большая часть этих предвестников может быть выявлена при помощи наземных или авиационных средств. Однако в тех случаях, когда имеют дело с протяженными техническими системами (такими, например, как магистральные нефте- и газопроводные системы, железные дороги, морской флот, горно-рудные производства, гидроэлектростанции, атомные станции и др.) решить эти задачи могут лишь системы космического мониторинга. Кроме того, без данных космической съемки, используемых при проектировании сложных технических систем, выборе, например, сейсмо- и гидробезопасных зон для их строительства, контроле хода строительных работ, зачастую невозможно обеспечить требования к их технической надёжности и последующей безопасной эксплуатации.

Практически все техногенные катастрофы связаны с отказами сложных организационно-технических систем, т.е. систем, на всех стадиях жизненного цикла которых активно участвует не только техническая система, но и человек, от безупречности действий которого зависит надежность и эффективность ее работы. Автор справочника «Рукотворные катастрофы» считает, что так называемый «человеческий фактор», который обуславливает возникновение до 90 % чрезвычайных ситуаций техногенного характера, практически целиком сводится к трём обстоятельствам: глупость, небрежность и корысть [1]. Автор работы [2] считает: несмотря на то, что катастрофа техногенного характера может произойти практически везде и не существует «абсолютного инструмента», способного ее предотвратить, есть ряд факторов, которые позволяют «отсрочить» подобное происшествие и минимизировать последствия. Это высокий уровень образования и активная гражданская позиция местного социума. Большую роль также играет уровень подготовки персонала государственных структур и частных компаний к действиям в экстремальных ситуациях.

Тем не менее в настоящее время количество чрезвычайных ситуаций техногенного характера, несмотря на успехи в развитии технологий автоматизированного управления, дистанционного контроля и обучения технического персонала, из года в год растёт, соперничая по своим губительным масштабам со стихийными бедствиями.

Цель работы. Анализ возможности достоверного прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Методы. На протяжении нескольких десятилетий Международный центр исследований эпидемиологии катастроф (CRED) ведет базу данных происходящих на планете катастроф природного и техногенного характера. Согласно критериям этой организации чрезвычайная ситуация признается катастрофой, если имеет место хотя бы одно из следующих четырех событий: гибель более 10 человек, наличие более 100 пострадавших, объявление местными властями чрезвычайного положения или их обращение за международной помощью. Техногенная катастрофа – один из видов катастроф, вызванных сбоем в работе технических систем, повлекших аварию на объекте промышленного комплекса, транспорта, как правило, сопровождающихся массовыми жертвами среди населения и экологическим бедствием, представляющих непосредственную угрозу общественной и национальной безопасности. Она относится к чрезвычайным ситуациям со всеми вытекающими отсюда социальными, юридическими и экономическими последствиями.

Один из вариантов классификации техногенных катастроф разделяет их на три основных типа:

- промышленные;
- транспортные;
- прочие.

По причинам происхождения техногенные катастрофы могут быть обусловлены:

- неумышленными ошибочными действиями обслуживающего персонала, который в силу невнимательности или слабой подготовки своими некорректными действиями спровоцировал чрезвычайную ситуацию;
- умышленными действиями обслуживающего персонала в целях злого умысла или саботажа;
- природными или погодными условиями;
- износом оборудования либо иными непредвиденными и нежелательными последствиями функционирования сложных организационно-технических систем.

Статистика CRED показывает, что с конца 70-х годов прошлого века количество катастроф техногенного характера в мире устойчиво растёт. Основной причиной этой тенденции считается рост сложности используемых человеком технических систем наряду с резким увеличением количества выполняемых ими функций, в то время как уровень знаний и подготовки разработчиков таких систем, а также тех, кто их производит и эксплуатирует, отстаёт от требуемого уровня организации работ на всех стадиях цикла.

Основными причинами техногенных пожаров являются нарушение технологического режима и мер пожарной безопасности, технические неисправности, сопровождающиеся возгораниями, человеческая небрежность и (или) злой умысел.

Взрывы мирного времени происходят вследствие ошибок и просчетов людей, присутствия в воздухе опасных концентраций горючих газов и взрывоопасной пыли, нарушения технологических циклов транспортирования горючих и взрывоопасных материалов, правил обращения (изготовление, хранение, транспортирование и утилизация) со взрывчатыми веществами и боеприпасами, а также террористических актов.

Причинами крупных авиакатастроф, которые сопровождаются гибелью людей и нанесением значительного материального ущерба, являются неисправности двигателей, разрушения в полёте отдельных конструкций самолета, нарушение работы систем управления, электропитания, связи, пилотирования, недостаток топлива, перебои в жизнеобеспечении экипажа и пассажиров, ошибки пилотов, неблагоприятные погодные условия, столкновения в воздухе с посторонними объектами, террористические акты, а также поражение боевым оружием.

Основными причинами аварий и катастроф на железнодорожном транспорте (сходы подвижного состава с рельсов, столкновения, наезды на препятствия на переездах, пожары и взрывы в вагонах) являются неисправности путей, подвижного состава, средств сигнализации, централизации и блокировки, перегруженность железнодорожных линий и поездов, ошибки диспетчеров, невнимательность и халатность машинистов.

В современном мире существует множество крупных предприятий ядерно-энергетического и химического комплексов. Наибольшую опасность человечеству несут чрезвычайные ситуации именно на радиационно и химически опасных объектах, о чём свидетельствуют крупнейшие в истории химическая и ядерная аварии (по масштабам близкие к катастрофам), произошедшие в Бхопале (Индия) в 1983 г. и в Чернобыле (СССР) в 1986 г.

Химическая авария (катастрофа) – это нарушение технологических процессов на химических объектах, сопровождаемое повреждением и (или) разрушением трубопроводов, емкостей, хранилищ, транспортных средств, которое приводит к выбросу химически опасных веществ в количествах, представляющих угрозу для биоценоза, а также жизни и здоровья людей. Кроме того, при определенных условиях некоторые нетоксичные вещества, сопровождающие химическую аварию (взрыв, пожар), могут образовать аварийно химически опасные вещества. В случае химической аварии происходит не только заражение приземного слоя атмосферы, но и водных источников, почвы, продуктов питания. Крупными запасами аварийно химически опасных веществ располагают химические, целлюлозно-бумажные и перерабатывающие комбинаты, заводы минеральных удобрений, черной и цветной металлургии. Наибольшее количество химических аварий происходит именно на предприятиях, производящих или хранящих хлор, аммиак, минеральные удобрения, гербициды, продукты органического и нефтеорганического синтеза.

В настоящее время во многих отраслях мирового хозяйства и науки в больших масштабах используют радиоактивные вещества и источники ионизирующих излучений (ядерные материалы), развивается ядерная энергетика. Открывая широкие энергетические и иные возможности, ядерные техника и технологии в то же время несут в себе большую опасность для людей и окружающей среды. Ядерные материалы приходится хранить, перевозить и перерабатывать. Остро стоит проблема захоронения отработанного ядерного топлива.

Радиационная авария – чрезвычайная ситуация, заключающаяся в утрате контроля над ядерным материалом из-за стихийных бедствий, неисправностей техники и оборудования, некачественных действий работников либо иных причин, которая приводит или может привести к поражению людей или к радиоактивному загрязнению окружающей среды. Радиационные аварии происходят на радиационно опасных объектах или на транспорте, занимающемся транспортированием грузов, содержащих в себе источники ионизирующего излучения.

Масштабы последствий аварий на гидротехнических сооружениях, особенно в случае неблагоприятного развития ситуации, сопоставимы со стихийными бедствиями метеорологической природы. Так, при разрушении плотин, дамб и гидроузлов возникает реальная опасность затопления низинных районов, как во время мощных циклонов. В результате значительные участки местности через 15...30 мин после прорыва оказываются затопленными слоем воды толщиной от 0,5 до 10 м, уровень которой может не спадать от нескольких часов до нескольких суток.

Предвестниками чрезвычайных ситуаций техногенного характера считаются физические явления, объективно свидетельствующие о потенциально опасных событиях и процессах на технических объектах и в сложных организационно-технических системах, которые могут быть инструментально выявлены и документально зафиксированы в целях принятия необходимых превентивных мер. Вся совокупность предвестников техногенных аварий и катастроф может быть объединена в четыре группы, с использованием каждой из которых либо их совокупности возможно прогнозирование момента наступления аварийной ситуации в целях принятия необходимых мер.

Первая группа предвестников представлена сбоями, отказами и неисправностями, обусловленными снижением уровня надежности сложных человеко-машинных технических систем и их компонентов. Из практики известны постепенные отказы оборудования, связанные с износом и/или исчерпанием технического ресурса, которые проявляются в виде аномальных отклонений в режиме работы системы, в виде её выхода из строя или прекращения функционирования ввиду полного исчерпания запасов топлива, энергии и других восполняемых ресурсов. Накопленный опыт создания и

эксплуатации сложных технических систем позволил разработать и внедрить методологию контроля их надежности и обеспечения безопасности.

Вторая группа предвестников объединяет сбои и отказы в работе, происшествия и аварии, вызванные внешними воздействиями метеорологической, сейсмической или антропогенной природы (ураганы, землетрясения, затопления, террористические акты). Такие технические аномалии возникают в случаях, когда внешние нагрузки превышают расчетные, принятые при разработке техники. Инструментальная регистрация таких аномалий (включая накопление соответствующего статистического материала), наряду с предупреждением о приближении стихийных бедствий может служить целям прогнозирования возникновения техногенной катастрофы. Кроме того, по результатам такого мониторинга могут корректироваться (усиливаться) расчётные параметры систем.

Третья группа предвестников – синергетические отказы и аварии, возникающие при длительном взаимодействии технической системы с окружающей средой. Так, например, многие технические системы, здания и сооружения, эксплуатируются в сейсмически активных или в метеорологически опасных районах. При этом технические системы и окружающая среда испытывают взаимное влияние, которое при определённых условиях может привести к аварии или катастрофе. Так, в частности, магистральные трубопроводы, железные дороги, линии электропередач, компрессорные станции, хранилища, городская и промышленная инфраструктуры располагаются в тропических зонах или районах вечной мерзлоты, охватывающих огромные территории планеты.

Четвёртая группа предвестников – физические признаки, обусловленные повышенной концентрацией опасных веществ, вредных газов и испарений, взрывоопасной пыли на технических и производственных объектах. Такие признаки обнаруживаются непосредственно инструментально в местах проявления (датчики, газоанализаторы) и дистанционно с использованием масс-спектрометров, оптических и лазерных приборов, устанавливаемых на средствах аэрокосмического мониторинга.

Применение средств аэрокосмического мониторинга (в том числе в целях контроля и диагностики) позволяет обеспечить выявление предвестников техногенных катастроф второй и третьей из приведённых групп. Предвестники первой и четвёртой групп могут быть эффективно выявлены с использованием наземных датчиков, информация с которых с использованием «космического контура управления» может в автоматизированном режиме накапливаться, обрабатываться и оперативно передаваться в соответствующие органы для принятия решений по обеспечению безопасности.

Под мониторингом потенциально опасных техногенных объектов понимается система наблюдений и контроля, производимых регулярно, по определенной программе для оценки состояния потенциально опасных

техногенных объектов, анализа происходящих процессов и своевременного выявления тенденций их изменения [6].

Техническую основу мониторинга составляют наземные и авиационно-космические средства соответствующих министерств, ведомств, территориальных органов власти и организаций (предприятий) в соответствии со сферами их ответственности.

Космические средства мониторинга предназначены в основном для выявления и уточнения обстановки, связанной с лесными пожарами, наводнениями и другими крупномасштабными опасными природными явлениями и процессами с незначительной динамикой.

Авиационные средства используют для тех же целей, что и космические, а также для получения данных о состоянии радиационной обстановки, обстановки в зонах широкомасштабных разрушений, о состоянии магистральных трубопроводов и ряда других видов обстановки (дорожной, снежной, ледовой и т.п.). Они имеют более широкие возможности по сравнению с космическими средствами по составу объектов наблюдения и по оперативности, поэтому находятся на оснащении ряда соответствующих мониторинговых подразделений.

Прогнозирование чрезвычайных ситуаций как понятие включает в себя достаточно широкий круг задач, состав которых обусловлен целями и задачами управленческого характера. Наиболее значимыми и необходимыми задачами прогнозирования являются: определение вероятности возникновения каждого из источников чрезвычайных ситуаций (техногенных аварий, экологических бедствий техногенного характера и т.п.) и соответственно масштабов чрезвычайных ситуаций, размеров их зон, возможные длительные последствия при возникновении чрезвычайных ситуаций определенных типов, масштабов, временных интервалов или их определенных совокупностей, потребности сил и средств для ликвидации прогнозируемых чрезвычайных ситуаций.

В целом, результаты мониторинга и прогнозирования являются исходной основой для разработки долгосрочных, среднесрочных и краткосрочных целевых программ, планов, а также для принятия соответствующих решений по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

Космический мониторинг среды, окружающей технические системы, позволяет:

- на ранней стадии обнаружить и предотвратить деструктивные процессы, протекающие в технических системах;
- обнаружить проливы нефти, утечки газов, случаи несанкционированного отбора нефтепродуктов и т.п.;
- осуществлять картографирование участков, на которых планируют строительство крупных технических систем и сооружений;

- проводить мониторинг самого строительства и обнаруживать ошибочные или преднамеренные отклонения в строительстве (нарушение маршрута прокладки трубопровода, строительства ЛЭП, железных дорог и др.);
- осуществлять геодезический мониторинг геодинамической обстановки для технических систем и сооружений недропользования;
- осуществлять экологический мониторинг в окрестности опасных технических объектов;
- оперативно обнаруживать и оповещать о начале аварийной ситуации (возгорания, выбросы газов, проливы опасных веществ и т.п.).

Кроме того, космическая система мониторинга может решать задачи поиска залежей минеральных и углеводородных полезных ископаемых, задачи контроля возобновляемых природных ресурсов и решать задачи мониторинга стихийных природных катастроф. Существующая в России спутниковая система позиционирования и навигации ГЛОНАСС позволяет оперативно определять местоположение опасных природных и техногенных объектов.

Спутниковые системы гидрометеорологии, обеспечивающие глобальный мониторинг климата и погоды, позволяют прогнозировать стихийные бедствия, связанные с возмущениями в атмосфере Земли: штормами, наводнениями, циклонами, ливневыми дождями, засухами, – и предупреждать о них.

Выводы. Основными задачами анализа и прогнозирования чрезвычайных ситуаций техногенного характера являются:

- выявление и идентификация возможных источников чрезвычайных ситуаций техногенного характера на соответствующей территории;
- оценка вероятности (частоты) возникновения стихийных бедствий, аварий, природных и техногенных катастроф (источников чрезвычайных ситуаций);
- прогнозирование возможных последствий при воздействии поражающих факторов источников чрезвычайных ситуаций на население и территорию.

Основные типы природных катаклизмов (гидрометеорологические и геологические) имеют многие факторы-предвестники, требующие тщательного изучения и построения моделей прогноза. Использование аэрокосмических средств регистрации одновременно с мониторингом самих событий является необходимым для получения полной, объективной картины и создания достоверных моделей прогноза природных катастроф. Разработка таких моделей позволила бы корректно оценить влияние природных факторов на техносферу, точнее районировать сейсмическую опасность, дополнить исходные данные по нагрузкам при строительстве в зонах тектонических нарушений [7]. Это является прямым путем снижения риска катастроф на новых проектах и уточнения опасности для существующей инфраструктуры.

Список литературы / References

1. Lee Davis. Man-made catastrophes. Checkmark Publishing, 2002, 400 p.
2. Петров, С.В. Опасные ситуации техногенного характера и защита от них / С.В. Петров. – М.: ЭНАС, 2008. – 224 с.
Petrov, S.V. *Opasnyye situatsii tekhnogenogo kharaktera i zashchita ot nikh* [Hazardous situations of an anthropogenic character and protection from them]. Moscow, ENAS Publ., 2008, 224 p.
3. Ветошкин, А.Г. Надежность технических систем и техногенный риск / А.Г. Ветошкин. – Пенза: Изд-во ПГУАиС, 2003. – 155 с.
Vetoshkin, A.G. *Nadyezhnost' tekhnicheskikh sistem i technogennyy risk* [Safety of technical systems and anthropogenic risk]. Penza, PGUAI S Publ., 2003, 155 p.
4. Влияние человеческого фактора на безопасность технических систем / Н.А. Махутов, Р.С. Ахмаханов, Е.Ф. Дубинин, В.И. Куксова // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций: науч. информ. сб. – 2004. – № 3. – С. 80 – 98.
Makhutov, N.A., Akhmakhanov, R.S., Dubinin, Ye.F., Kuksova, V.I. *Vliyaniye chelovecheskogo faktora na bezopasnost' tekhnicheskikh sistem* [Impact of the human factor on safety of technical systems]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy: nauch. inform. sb.* [Problems of safety and emergency situations: scientific information collection]. 2004, no. 3, pp. 80 – 98.
5. Алымов, В.Т. Анализ техногенного риска / В.Т. Алымов, В.П.Крапчатов, Н.П. Тарасова. – М.: Круглый год, 2000. – 160 с.
Alymov, V.T., Krpchatov, V.P., Tarasova, N.P. *Analiz tekhnogenogo riska* [Analysis of the anthropogenic risk]. Moscow, Kruglyy god Publ., 2000, 160 p.
6. Топольский, Н.Г. Современные автоматизированные системы мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций / Н.Г. Топольский, В.И. Чижиков // Системы безопасности: мат. XXVII науч.-техн. конф. – М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2008. – С. 130 – 134.
Topol'skiy, N.G., Chizhikov, V.I. *Sovremennyye avtomatizirovannyye sistemy monitoringa i prognozirovaniya chrezvychaynykh situatsiy* [The modern automated systems for monitoring and forecasting the emergency situations]. *Sistemy bezopasnosti: mat. XXVII nauch.-tekhn. konf.* [Safety systems: materials of the 27th scientific and technical conference]. Moscow, Akademiya GPS MChS RF, 2008, pp. 130 – 134.
7. Гришин, А.М. Моделирование и прогноз техногенных и экологических катастроф / А.М. Гришин // Математическое и физическое моделирование сопряженных задач механики реагирующих сред и экологии: избр. докл. междунар. конф. – Томск: Изд-во ТГУ, 2000. – С. 64 – 87.
Grishin, A.M. *Modelirovaniye i prognoz tekhnogennykh i ekologicheskikh katastrof* [Modeling and forecasting the anthropogenic and ecological disasters]. *Matematicheskoye i fizicheskoye modelirovaniye sopryazhyennykh zadach mekhaniki*

reagiruyushchikh sred i ekologii: izbr. dokl. mezhdunar. konf. [The mathematical and physical modeling of conjugated problems of mechanics of reacting environments and ecology: selected reports of the International conference]. Tomsk, TGU Publ., 2000, pp. 64 – 87.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.А. Каниным.
Дата поступления рукописи 08.02.2018

Yekaterina Viktorovna Babenko, *Cand. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: papyrus@list.ru*
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-44

FORECAST OF EMERGENCY SITUATIONS OF AN ANTHROPOGENIC CHARACTER

Purpose. Analysis of methods, possibilities and prospects allowing forecasting the anthropogenic accidents for sure.

Methods. Systematical review of classification, facts, consequences and tendencies associated with the emergency situations of the anthropogenic character in the modern world.

Results. The primal problems of forecasting the emergency situations of the anthropogenic character have been determined.

Scientific novelty. The prospects of the use of precursors of the emergency situations of the anthropogenic character have been enumerated.

Practical value. The possibility to obtain, process and use the information about the supposed process for the experimental investigation by means of the computer-aided engineering is determined. The documental and instrumental registration of the physical precursors of the anthropogenic accidents with further study and processing enables to forecast the anthropogenic catastrophes and to take preventive measures.

Key words: *anthropogenic accident; classification; accident; hazardous substances; precursors; monitoring; forecasting.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК 622.822.22:622.693.26

Сергей Павлович Высоцкий, д-р техн. наук, завкафедрой; e-mail: sp.vysotsky@gmail.com

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

286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. +38 071-448-70-95;

Дмитрий Александрович Козырь, ст. преподаватель; e-mail: kozyr.dmitriy@gmail.com

*Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий
национальный технический университет»*

83001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. +38 (062) 301-07-09

ДИСТАНЦИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ТЕПЛООВОГО СОСТОЯНИЯ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ

Цель. Определение влияния основных факторов на результаты тепловизионной съемки горящих породных отвалов, образованных при добыче угля разной стадии метаморфизма.

Методика основана на применении классических решений теории теплопроводности и дополнения Хантли.

Результаты. Проведенный анализ развития дистанционных методов и способов контроля температуры породных отвалов позволил разработать критериальное уравнение, которое учитывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах. Исследованиями установлено, что при дистанционном контроле коэффициент теплоотдачи в атмосферу очагов самовозгорания на породных отвалах, образованных при добыче угля высокой стадии метаморфизма (Донецкий бассейн, Подмосковский бассейн), выше, чем на породных отвалах, образованных при добыче угля ранней стадии метаморфизма (Печорский бассейн, Челябинский бассейн). Установлено, что для породных отвалов, образованных при добыче углей высокой стадии метаморфизма, расстояние дистанционного контроля больше, чем для породных отвалов, образованных при добыче углей ранней стадии метаморфизма.

Научная новизна. Впервые разработанное критериальное уравнение описывает динамику изменения коэффициента теплоотдачи в атмосферу при дистанционном контроле температуры и учитывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах.

Практическая значимость. Полученные результаты можно использовать при дистанционном контроле теплового состояния породных отвалов.

Ключевые слова: *породный отвал; самовозгорание; пропускание атмосферы; беспилотные летательные аппараты; стадия метаморфизма угля.*

Постановка проблемы. В настоящее время в Донецком регионе насчитывается более 600 породных отвалов, из них около 140 горящих. Горящие породные отвалы Донбасса зачастую находятся в черте плотной городской застройки. При их эксплуатации имеют место катастрофические процессы, связанные с взрывным горением воздушно-газовых смесей и так называемыми физическими взрывами, происходящими при поступлении воды в область раскаленных пород.

Для выявления очагов самовозгорания и своевременного принятия мер по предупреждению самовозгорания пород необходимо контролировать тепловое

состояние породных отвалов (не реже 1 раза в год). Результаты измерений температуры используют для определения площади горячей поверхности отвала, необходимой для разработки проектов тушения и установления объемов выбросов вредных веществ.

Для принятия оптимального комплекса мероприятий по предупреждению и ликвидации очагов самовозгорания необходим своевременный мониторинг стадий развития процесса окисления породных масс отвалов. С развитием пожара расход средств на его тушение значительно увеличивается. Важно своевременно выявить, локализовать и ликвидировать очаг самовозгорания.

Большие возможности выявлять горение породных отвалов на ранних стадиях дает применение дистанционных методов контроля температуры. Для широкого применения дистанционных средств и способов температурного контроля с использованием беспилотных летательных аппаратов отсутствуют законодательно утвержденные методики, которые позволяют учитывать условия съемки и влияние внешних факторов на результаты тепловизионной съемки.

Анализ последних исследований. Впервые методы дистанционного зондирования для обнаружения и определения местоположения очагов самовозгорания на породных отвалах были применены в США в 1963 г. в Скрантоне (штат Пенсильвания). В 60-е и 70-е годы многие американские ученые проводили наблюдения за горящими породными отвалами, используя тепловизионные камеры, размещенные на борту летательных аппаратов. Однако технические возможности тепловизионной техники в тот период давали очень грубую оценку температуры очагов самовозгорания [1]. Методы дистанционного зондирования горящих породных отвалов, основанные на спектральном сканировании в тепловом инфракрасном диапазоне, использовали с 1983 г. в угледобывающих районах Китая и Индии, где были получены карты спонтанного нагревания породных отвалов [2, 3]. Анализ состояния породных отвалов с использованием летательных аппаратов и тепловизора был также осуществлен на породных отвалах Польши. Во время воздушной съемки регистрировали термограммы вдоль траектории полета, при этом получали серию изображений, которые позволили построить термографическую карту района [4].

Вышеприведённые исследования не учитывают условий съемки и влияния внешних факторов на результаты тепловизионной съемки. К основным внешним факторам относятся расстояние от очага самовозгорания до тепловизора, размеры очага самовозгорания, ракурс дистанционной съемки, теплопроводные свойства породы и т.д. [5].

Цель исследований. Определение влияния основных факторов на результаты тепловизионной съемки горящих породных отвалов, образованных при добыче угля разной стадии метаморфизма с использованием беспилотных летательных аппаратов.

Результаты исследований. Учитывая сложность процессов теплообмена между очагом самовозгорания и средой (породой и атмосферой) для их описания, применен метод анализа размерностей с учетом дополнения Хантли.

Представим очаг самовозгорания в виде геометрической фигуры с эквивалентным диаметром d , м. Очаг самовозгорания породы, с коэффициентом теплоотдачи за счет теплопроводности α_n , Дж/(м²·К·с), и коэффициентом теплопроводности λ_n , Дж/(м²·К·с), имеет температуру T , К. Тепловой поток Q , Дж/с, проходя через атмосферу с коэффициентом теплоотдачи α_a , Дж/(м²·К·с), коэффициентом теплопроводности λ_a , Дж/(м²·К·с), фиксируется тепловизором на расстоянии L , м, с длительностью измерения τ , с (см. таблицу).

Параметры взаимодействия очага тепловыделения с окружающей средой и тепловизором

Параметр	L_x	L_y	L_z	T	Q	τ	n
α_a	-	-	-2	-1	1	-1	1
α_n	-2/3	-2/3	-2/3	-1	1	-1	a
λ_a	-	-	-1	-1	1	-1	b
λ_n	-1/3	-1/3	-1/3	-1	1	-1	c
L	-	-	1	-	-	-	d
D	1/3	1/3	1/3	-	-	-	e

Параметры взаимодействия очага тепловыделения с окружающей средой и тепловизором представим в виде уравнений

$$-\frac{2}{3}a - \frac{1}{3}c + \frac{1}{3}e + \frac{1}{2}k = 0; \quad (1)$$

$$-\frac{2}{3}a - b - \frac{1}{3}c + d + \frac{1}{3}e = -2; \quad (2)$$

$$a + b + c = 1; \quad (3)$$

$$a + b + c + k = 1. \quad (4)$$

Решив уравнения (1)-(4) с учетом экспериментальных данных, получим следующие значения степеней уравнения: $a = 0,5$; $b = 0,167$; $c = 0,333$; $d = -1,833$; $e = 1,333$; $k = 0$.

Уравнение коэффициента теплоотдачи примет вид

$$\alpha_a = \alpha_n^{0,5} \lambda_a^{0,167} \lambda_n^{0,333} L^{-1,833} d^{1,333}. \quad (5)$$

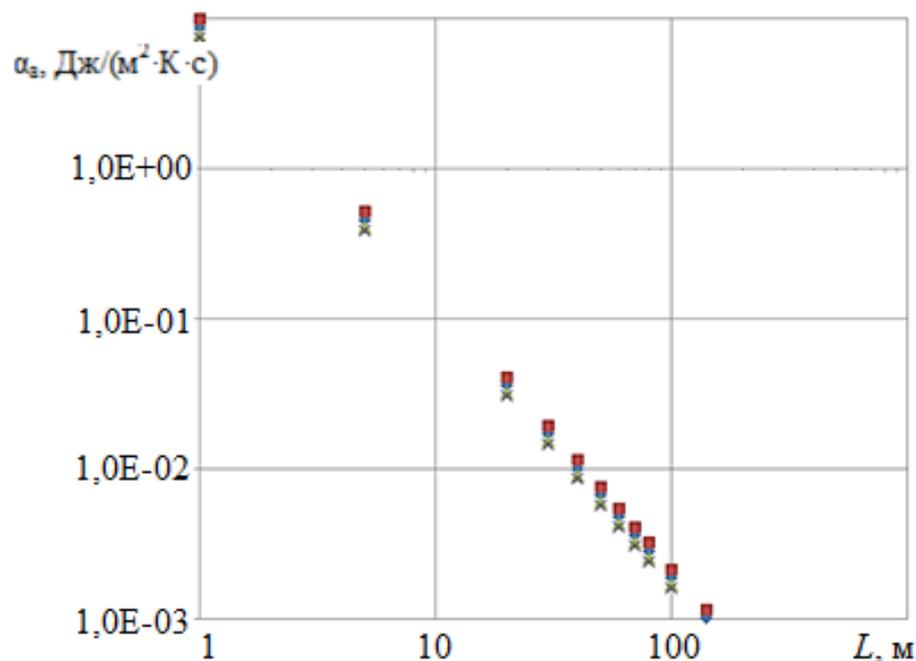
Критериальное уравнение коэффициента теплоотдачи в атмосферу имеет вид

$$\frac{\alpha_a L}{\lambda_a} = \left(\frac{\alpha_n d}{\lambda_n} \right)^{0,5} \left(\frac{\lambda_n d}{\lambda_a L} \right)^{0,833}. \quad (6)$$

В уравнении (6) значение критерия Нуссельта атмосферного воздуха Nu_a , характеризующее отвод теплоты излучением, пропорционально квадратному корню из теплоотдачи за счет отвода теплоты к породе и, соответственно, теплопроводных свойств породы и атмосферы.

Угли разной стадии метаморфизма избирательно проявляют интенсивность самовозгорания на разных стадиях горения породных отвалов. Угли высокой стадии метаморфизма характеризуются низким выходом летучих веществ и высокой пористостью, что обуславливает высокую концентрацию кислорода и может свидетельствовать о преобладании стадии химического окисления угля при самовозгорании породных отвалов. Угли низкой стадии метаморфизма характеризуются большой влажностью, что, предположительно, может оказывать влияние на биохимическую стадию окисления угля.

Степень метаморфизма углей влияет на их теплофизические свойства, в частности, на теплопроводность. Увеличение плотности углей с ростом степени метаморфизма отражается на их тепловых свойствах. Значение коэффициента теплопроводности увеличивается по мере перехода к газовым углям, с одной стороны, к тощим и антрацитам – с другой [6, 7]. Оценим влияние расстояния дистанционной температурной съемки на коэффициент теплоотдачи в атмосферу при использовании углей разных стадий метаморфизма (см. рисунок).



Зависимость коэффициента теплоотдачи в атмосферу от расстояния между объектом тепловыделения и измерительным устройством:

- ◆ – Донецкий бассейн; $\alpha_a = 8,66 \cdot L^{-1,833}$ $R^2 = 0,99$;
- – Подмосковский бассейн; $\alpha_a = 9,87 \cdot L^{-1,833}$ $R^2 = 0,99$;
- ▲ – Печорский бассейн; $\alpha_a = 7,78 \cdot L^{-1,833}$ $R^2 = 0,99$;
- × – Челябинский бассейн; $\alpha_a = 7,39 \cdot L^{-1,833}$ $R^2 = 0,99$

При тепловизионной съемке породных отвалов, образованных при добыче углей высокой стадии метаморфизма (Донецкий и Подмосковский бассейны), коэффициент теплоотдачи в атмосферу выше, чем при съемке породных отвалов, образованных при добыче углей ранней стадии метаморфизма (Печорский и Челябинский бассейны).

При использовании критериального уравнения установлено, что для породных отвалов, образованных при добыче углей высокой стадии метаморфизма (Донецкий и Подмосковский бассейны), расстояние дистанционного контроля больше, чем для породных отвалов, образованных при добыче углей ранней стадии метаморфизма (Печорский и Челябинский бассейны). Так, расстояние дистанционного контроля породных отвалов с коэффициентом теплоотдачи в атмосферу $1,08 \cdot 10^{-4}$ Дж/(м²·К·с) для углей Подмосковского бассейна равно 143 м, для углей Донбасса 133 м, для углей Печорского бассейна 125 м, а для углей Челябинского бассейна 122 м.

Выводы. Впервые разработанное критериальное уравнение учитывает основные факторы, влияющие на дистанционное измерение температуры очагов самовозгорания на породных отвалах. Установлено влияние степени метаморфизма угля на предельное расстояние дистанционного контроля теплового состояния породных отвалов. Значение критерия Нуссельта атмосферного воздуха, характеризующее отвод теплоты излучением, пропорционально квадратному корню из критерия Нуссельта, характеризующего отвод теплоты к породе.

Список литературы/References

1. Report 2002. Coal Waste Impoundments Risks, Responses, and Alternatives Committee on Coal Waste Impoundments, Committee on Earth Resources, Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies National Research Council. NATIONAL ACADEMY PRESS, Washington.

2. Chunli, Liu, Shushen, Li, Qingdang, Qiao, Jingshu, Wang and Ziqiang, Pan. 1998. Management of Spontaneous Combustion in Coal Mine Waste Tips in China. Water, Air, & Soil Pollution vol. 103, numbers 1–4.

3. Wang, Yun-jia, Sheng, Yao-bin, Gu, Qiang, Sun, Yue-yue, Wei, Xiu-jun and Zhang, Zhi-jie. 2008. Infrared thermography monitoring and early warning of the spontaneous combustion of coal gangue pile. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences vol. XXXVII. Part B8. Beijing. pp. 203–206.

4. Wasilewski, Skotniczny. Mining waste dumps – modern monitoring of thermal and gas activities / *Gospodarka Surowcami Mineralnymi – Mineral Resources Management* 31(1) 2015, 155–182.

5. Козырь, Д.А. Обоснование методики теплового неразрушающего контроля поверхности источников горения и самонагревания на породных отвалах угольных шахт / Д.А. Козырь // Проблемы недропользования: сб. тр. Международного форума-конкурса молодых ученых. Ч. II / Санкт-Петербургский горный университет. – СПб., 2016. – С. 104 – 106.

Kozyr, D.A. Obosnovaniye metodiki teplovogo nerazrushayushchego kontrolya poverkhnosti istochnikov goreniya i samonagrevaniya na porodnykh otvalakh ugol'nykh shakht [Substantiation of the technique of thermal non-destructive testing of the surface of combustion sources and self-heating on rock dumps of coal mines]. *Problemy nedropol'zovaniya: Sbornik trudov mezhdunarodnogo foruma-konkursa molodykh uchenykh. Chast' II / Sankt-Peterburgskiy gornyy universitet. SPb, 2016. S 104 – 106.*

6. Греков, С.П. Определение склонности углей к самовозгоранию / С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2014. – Вып. 51. – С. 88 – 100.

Grekov, S.P., Orlikova V.P., Vsyakiy A.A. Opredeleniye sklonnosti ugley k samovozgoraniyu [Determination of the propensity of coals to spontaneous combustion. Mine rescue business]. *Gornospasatel'noye delo. – 2014. – Вып. 51, s. 88 – 100.*

7. Захаров, Е.И. Физико-химические свойства углей и угольных массивов / Е.И. Захаров, Н.М. Качурин, И.И. Мохначук // Промышленная безопасность. – ТулГУ, 2012. – С. 58 – 67.

Zakharov, Ye.I., Kachurin N.M., Mokhnachuk I.I.. Fiziko-khimicheskiye svoystva ugley i ugol'nykh massivov [Physical and chemical properties of coal and coal massifs]. *Promyshlennaya bezopasnost', TulGU, 2012 g., s. 58 – 67.*

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.И. Сердюком.
Дата поступления рукописи 24.04.2018*

Sergei Pavlovich Vysotsky, Dr.Sc. tech., Professor, Head of the Department "Technospheric Security";

e-mail: sp.vysotsky@gmail.com

Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture

286123, DNR, Makeevka, ul. Derzhavin, 2. Tel. 071-448-70-95;

Dmitry Alexandrovich Kozyr, senior lecturer; e-mail: kozyr.dmitriy@gmail.com

Donetsk National Technical University

83001, Donetsk, ul. Artema, 58. Tel. +38 (062) 301-07-09

REMOTE CONTROL OF THERMAL STATE WASTE DUMPS

Purpose. Determination of the influence of the main factors on the results of thermal imaging of burning waste dumps formed during coal mining at different stages of metamorphism.

The methods are based on the application of classical solutions of the theory of heat conductivity and the Huntley supplement.

Results. The article analyzes the development of remote methods and methods for controlling the temperature of rock dumps. For the first time, a criterial equation has been developed that describes the dynamics of the change in the heat transfer coefficient to the atmosphere for remote temperature control. The criterion equation takes into account the main factors influencing the remote measurement of the temperature of the spontaneous combustion sites on the rock dumps. The results of using the criterial equation with sufficient accuracy are consistent with the results of experimental studies. It has been established that, with remote monitoring, the coefficient of heat transfer to the atmosphere of the spontaneous combustion sites on rock heaps formed during the mining of coal of high stage of metamorphism (the Donetsk basin, the Moscow region basin) is higher than in the rock dumps formed during the coal mining of the early stage of metamorphism (Pechora basin, Chelyabinsk pool).

Scientific novelty. It is established that the value of the Nusselt criterion of atmospheric air, characterizing the heat removal by radiation, is proportional to the square root of the Nusselt criterion characterizing the heat transfer to the rock and, accordingly, the thermal conductive properties of the rock and the atmosphere

Practical significance. The results obtained can be used for remote monitoring of the thermal state of rock dumps.

Key words: waste rock dump, self-ignition, atmospheric transmission, unmanned aerial vehicles, coal metamorphism stage.

УДК 622.281.74:001.891.572

Александр Олегович Новиков, д-р техн. наук, проф.; e-mail: rpm2000avanek@mail.ru;

Павел Сергеевич Дрипан, ст. преподаватель; e-mail: dripanps@mail.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»

283001, Донецк, ул. Артема, 58. Тел. (+38 062) 301-03-09

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ВНЕДРЕНИЯ АНКЕРА В ПОРОДНЫЙ МАССИВ ПОД НАГРУЗКОЙ

Цель. Выявить закономерности процесса установки в породный массив горной выработки угольной шахты анкера большего диаметра, чем диаметр направляющего шпура, при динамическом на него воздействии с учетом возникающих сопротивлений перемещению анкера в сечении и по длине для обоснования параметров устройства крепления.

Методы. Теоретический метод исследований с использованием теории продольного удара, изложенной в работе Сен-Венана и уточненной в дальнейшем Буссинеском, а также результатов, полученных в работах Юнга по распространению деформации в телах при силовых воздействиях.

Результаты. Получены зависимости для определения местоположения, перемещения, ускорений, деформаций и напряжений анкера в массиве горных пород, учитывающие его геометрические размеры и механические характеристики, которые позволяют выбрать параметры устройства, обеспечивающего необходимую динамическую нагрузку на анкер, и определить скорость его установки в породный массив.

Научная новизна. Впервые разработана математическая модель процесса установки в породный массив анкера большего диаметра, чем диаметр направляющего шпура, при динамическом на него воздействии с учетом возникающих сопротивлений перемещению анкера в сечении и по длине, что обеспечит безопасное ведение горных работ и значительно снизит затраты при креплении горного массива.

Практическая значимость. Полученные зависимости позволяют выбрать параметры устройства, обеспечивающего необходимую динамическую нагрузку на анкер, скорость его движения в породный массив и безопасность ведения горных работ.

Ключевые слова: *горный массив; анкер; направляющий шпур; динамическая нагрузка; деформация; напряжение; математическая модель.*

Постановка проблемы. В настоящее время данные о травматизме в угольной отрасли показывают, что до 30 % несчастных случаев происходят в забойной части выработок при ведении подготовительных работ из-за несвоевременной установки или отсутствия временного крепления. Одним из перспективных направлений решения этой проблемы на шахтах является установка анкерной крепи сразу после выемки породы в забое. Технологичность и высокий уровень механизации при ее возведении позволяют не только повысить темпы работ, но и обеспечить высокий уровень безопасности производства. Наибольшее распространение в условиях шахт Донецкого угольного бассейна получили сталеполимерные анкеры, технологию установки которых и параметры крепи определяют в соответствии с действующими нормативными документами [1]. До 50 % стоимости установки

таких анкеров составляют затраты на ампулы с полимерными смолами, с помощью которых анкеры закрепляют в шпурах. В этой связи исследования, направленные на разработку технологий и конструкции анкеров, устанавливаемых безраспорным (бесклеевым) способом, перспективны и актуальны.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время в мировой практике применяют многочисленные безраспорные конструкции анкеров, такие, как винтовые анкеры «Сплит-Сет» и «свел-лекс», трубчатые взрывораспорные анкеры и т.д. [2]. Однако они не получили широкого применения в практике из-за необходимости изготовления анкеров из высокопрочных упругих сталей и дорогого оборудования для установки. Предложенный в США способ установки анкеров путем их силового вдавливания с помощью гидравлической установки в породный массив [3] не нашел промышленного использования по тем же причинам, а также из-за невозможности обеспечить необходимое пространственное расположение устанавливаемого анкера. ДонНТУ был предложен и запатентован способ установки стального анкера путем его впрессовки динамической нагрузкой в направляющий шпур меньшего диаметра [4].

Цель работы – выявление закономерностей процесса установки в породный массив горной выработки угольной шахты анкера большего диаметра, чем диаметр направляющего шпура, при динамическом на него воздействии с учетом возникающих сопротивлений перемещению шпура в сечении и по длине для обоснования параметров устройства крепления.

Результаты исследований. Для описания процесса установки анкера в породный массив воспользуемся теорией продольного удара, впервые изложенной в работе Сен-Венана, уточненной в дальнейшем Буссинеском [5].

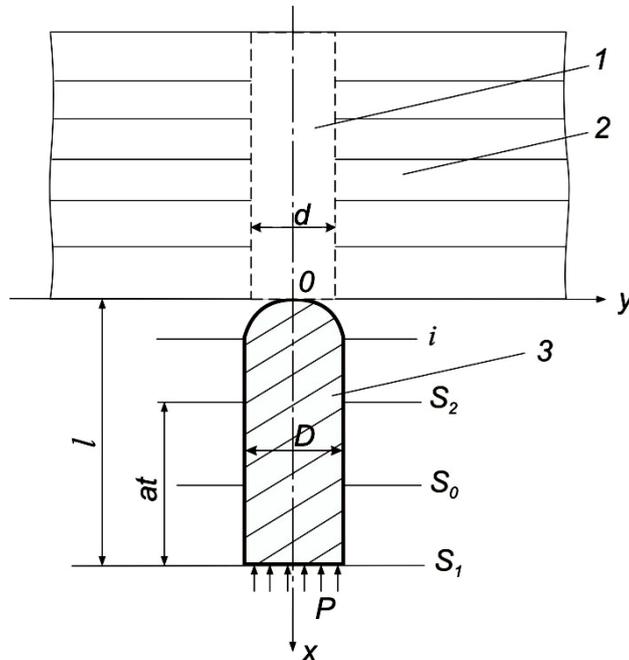
Пусть на нижнем основании цилиндрического тела в момент времени $t = 0$ действует динамическая нагрузка, кинетическая энергия которой равна $W_0 = m \frac{v_0^2}{2}$, где m – масса движущегося тела, кг; v_0 – его скорость в момент удара, м/с².

Энергия удара воспринимается нижним сечением анкера (хвостовик) и распространяется вверх со скоростью звука в его материале a , м/с².

Считаем, что $v_1 < v_0$, так как из-за неровностей в верхнем сечении анкера происходят его неупругие деформации, т.е. смятие. Тогда составим дифференциальное уравнение продольного удара по анкеру, представляющему собой цилиндрическое тело с площадью поперечного сечения 10^{-4} м² и длиной ℓ , расчетная схема которого представлена на рисунке.

Каждому сечению анкера соответствует координата, выражающая его местоположение относительно поверхности удара. После удара каждое сечение вертикально переместится на высоту U , зависящую от времени t .

При этом U – функция независимых переменных x, t , деформация $\varepsilon_x = \frac{\partial U}{\partial x}$, а упругие напряжения $\sigma_x = E \frac{\partial U}{\partial x}$, $\frac{\partial U}{\partial t}$ – скорость перемещения каждого сечения во времени; E – модуль упругости материала анкера, МПа.



Расчётная схема установки анкера в породный массив под действием динамической нагрузки:

1 – шпур; 2 – породный массив; 3 – анкер; i, S_0, S_1, S_2 – сечения; D, d – диаметры анкера и шпура соответственно; P – динамическая нагрузка

При упругом состоянии анкера должно быть соблюдено условие

$$E \frac{v_0}{a} \leq \sigma_{п(сж)}, \quad (1)$$

где $\sigma_{п(сж)}$ – предел упругости материала анкера, МПа.

Найдем вид функции $U(x, t)$.

Для вывода дифференциального уравнения рассмотрено условие равновесия элементарного кубика анкера со сторонами dx, dy, dz , на который действует сила p , равная

$$\left(\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx \right) dydz - p dydz = \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx dy dz. \quad (2)$$

С учетом этой зависимости и работы [6] получим

$$a^2 \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}, \quad (3)$$

где $a = \sqrt{\frac{Eg}{\gamma}}$ – скорость распространения деформации вдоль анкера, т.е.

скорость звука (g – ускорение силы тяжести, м/с²; γ – удельный вес материала анкера, Н/м³).

Согласно [7], представим уравнение (3) как сумму двух произвольных функций от аргументов $at + x$ и $at - x$, т.е.

$$U = f_1(at - x) + f_2(at + x), \quad (4)$$

где f_1 и f_2 – произвольные функции от аргументов, стоящих в скобках.

Вид функций f_1 и f_2 определим из граничных и начальных условий: при $t = 0$ для всех сечений анкера, т.е. $x \in [0; \ell]$ $\frac{\partial U}{\partial t}$ и σ_x равны нулю. При этом $f_2(z) = -f_1(z)$. Тогда получим

$$a^2 \left(f_1''(at - x) + f_1''(at + x) \right) = -a^2 \left(f_2''(at - x) + f_2''(at + x) \right); \quad (5)$$

$$U = f_1(at - x) - f_1(at + x); \quad (6)$$

$$\begin{cases} 0 = -f_1'(-x) - f_1'(x); \\ 0 = af_1'(-x) - af_1'(x). \end{cases} \quad (7)$$

Решив систему уравнений (7) относительно функций $f_1'(-x)$ и $f_1'(x)$, получим

$$\begin{cases} f_1'(x) = 0; \\ f_1'(-x) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

для значений $x \in [0; \ell]$. Отсюда следует, что $f_1'(z) = 0$ для всех z в интервале $x \in [-\ell; \ell]$.

Рассмотрим состояние анкера через время t после удара (при $at < \ell$).

С учетом того, что $f_1'(z) = 0$ при $z < \ell$ получим

$$f_1'(at + x) = f_1'(at - x) = 0. \quad (9)$$

С учетом заданных граничных условий деформации и скорости любого сечения, лежащего ниже сечения S_2 , будут равны нулю.

Рассмотрим сечение S_0 , лежащее выше сечения S_2 . Для него имеет место следующее соотношение: $at - x < \ell$, а $at + x > \ell$.

Тогда согласно (8):

$$\begin{cases} f_1'(at - x) = 0; \\ f_1'(at + x) \neq 0. \end{cases} \quad (10)$$

С учетом заданных граничных условий деформации и скорости в сечении S_0 будут равны:

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -f_1'(at + x); \quad (11)$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -af_1'(at + x). \quad (12)$$

Следовательно, волна деформаций распространяется от нижнего сечения анкера, воспринимающего удар со скоростью звука «а», а сечения, не захваченные волной, находятся в покое. В сечениях, захваченных волной, деформации и скорости описываются уравнениями (11) и (12).

Для определения вида функции $f_1'(z)$ при $z > \ell$ воспользуемся условием перемещения нижнего сечения анкера, непосредственно получившего удар. В этом сечении $x = \ell$. Тогда $at + x = at + \ell > \ell$.

Движение ударного инструмента массой m под действием реакции нижнего конца анкера определяется началом Даламбера с учетом выражений

$$\left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{x=\ell}, \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=\ell} \text{ и } E \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=\ell} = -m \left(\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} \right)_{x=\ell} \quad (13)$$

примет вид

$$k\ell \left[f_1''(at - \ell) - f_1''(at + \ell) \right] = f_1'(at - \ell) - f_1'(at + \ell). \quad (14)$$

С учетом, что $at + \ell = z$; $at - \ell = z - 2\ell$, после преобразований из уравнения (14) получим вид искомой функции

$$f_1''(z) + \frac{1}{k\ell} f_1'(z) = f_1''(z - 2\ell) - \frac{1}{k\ell} f_1'(z - 2\ell). \quad (15)$$

При изменении аргумента z в интервале $\ell < z < 3\ell$ получим $-\ell < z - 2\ell < \ell$, следовательно, $f_1'(z - 2\ell) = 0$ и его производная тоже равна нулю, т.е. $f_1''(z - 2\ell) = 0$.

Тогда из соотношения (15) для определения неизвестной функции $f_1'(z)$ получим уравнение вида

$$f_1''(z) + \frac{1}{k\ell} f_1'(z) = 0. \quad (16)$$

Интегрируя его и определив константу c с учетом $t = 0$ для нижнего конца анкера, окончательно получим

$$f_1'(z) = \frac{v_0}{a} e^{\frac{\ell - z}{k\ell}}. \quad (17)$$

Следовательно, в период распространения прямой волны (снизу вверх) скорость и деформация сечений, захваченных ею, описываются соотношениями вида

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -v_0 e^{\frac{\ell - at - x}{k\ell}}; \quad (18)$$

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{v_0}{a} e^{\frac{\ell - at - x}{k\ell}}. \quad (19)$$

Определим состояние анкера в момент, когда прямая волна достигает верхнего конца, т.е. когда $at = \ell$.

Тогда, согласно (18), (19), при $x = 0$ получим

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -\frac{v_0}{a}. \quad (20)$$

Дойдя до верхнего основания, волна деформации отразится и распространится вниз. Рассмотрим момент времени t , в который волна достигла точки 0.

Тогда для i сечения, подверженного воздействию отраженной волны, с учетом $t = \frac{\ell}{a}$ при $x = 0$, уравнение запишем в виде

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -2 \frac{v_0}{a}, \quad (21)$$

а в последующие моменты времени

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -2 \frac{v_0}{a} e^{\frac{\ell - at}{kl}}. \quad (22)$$

Следовательно, в момент отражения деформации на верхнем конце анкера напряжения удваиваются, а затем уменьшаются по абсолютной величине до нуля. Если за время $t \leq 2\ell/a$ напряжение в нижнем конце анкера не обратится в нуль, то волна вторично отразится от нижнего сечения, при этом $f_1'(z)$ для $3\ell < z < 5\ell$ определяем из выражения

$$f_1'(z) = \frac{v_0}{a} e^{\frac{\ell - z}{kl}} + \frac{v_0}{a} \left[1 - \frac{2}{kl}(z - 3\ell) \right] e^{\frac{3\ell - z}{kl}}; \quad 3\ell < z < 5\ell. \quad (23)$$

Рассмотрим установку анкера под действием динамической нагрузки с учетом того, что его верхний конец неподвижен, пока давление на него ниже величины P , равной сопротивлению пород, приложенному к нижнему концу. При установке анкера в массив его верхний конец испытывает постоянное сопротивление, равное $\frac{P}{S}$, где $S = \pi(R^2 - r^2)$, R , r – радиусы анкера и направляющего шпура соответственно, м.

Условие движения анкера в глубь массива при первой отраженной волне выполняется при сопротивлении перемещению, меньшем $2\varepsilon_x$. Начало его движения совпадет с моментом достижения прямой волны его верхнего основания. При этом напряжения его нижней части будут постоянными и равными

$$\sigma_x = E \left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = -\frac{P}{S}. \quad (24)$$

Вид функции $f_2(at + x)$ при $t = 0$ с учетом заданных граничных условий после преобразований:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial x} &= -f_1'(at-x) + f_1'(at+x) - p; \\ \frac{\partial U}{\partial t} &= af_1'(at-x) + af_1'(at+x). \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

Функции $f_1'(-x)$ и $f_1'(x)$ при $t=0$ примут вид

$$f_1'(x) = -\frac{v_0}{a} e^{-\frac{x}{kl}} + \frac{p}{2}; \quad (26)$$

$$f_1'(-x) = -\frac{p}{2}. \quad (27)$$

Они справедливы для всех x из интервала $[0; \ell]$, а выражение (26) определяет форму функции $f_1'(z)$ для значений аргумента $0 < z < \ell$.

Если перемещение анкера заканчивается к моменту времени T (отраженная волна распространяется сверху вниз при $aT \leq \ell$), то выражение (25) примет вид

$$\left(\frac{\partial U}{\partial t} \right)_{x=0} = af_1'(at) + af_1'(at) = 2af_1'(at). \quad (28)$$

Тогда скорость движения нижнего конца анкера определится из выражения

$$\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)_{x=0} = -2v_0 e^{-\frac{at}{kl}} + ap. \quad (29)$$

С учетом граничного условия $t=T$ скорость перемещения анкера равна нулю, окончательно получим

$$-2v_0 e^{-\frac{aT}{kl}} + ap = 0. \quad (30)$$

Время установки анкера определяем из выражения

$$T = -\frac{kl}{a} \ln \left(\frac{pa}{v_0} \right). \quad (31)$$

Функция $f(z)$ в этом случае примет вид

$$f(z) = \int \left(-\frac{v_0}{a} e^{-\frac{z}{kl}} + \frac{p}{2} \right) dz = kl \frac{v_0}{a} e^{-\frac{z}{kl}} + \frac{pz}{2} + C_1. \quad (32)$$

Интегрируя (30) и определив константу с учетом $t=0$ для нижнего конца анкера, окончательно получим

$$(U)_{x=0} = 2kl \frac{v_0}{a} \left(e^{-\frac{at}{kl}} - 1 \right) + ap\ell. \quad (33)$$

Для определения координаты нижнего конца анкера при его остановке достаточно подставить в формулу (32) $t=T$. Тогда

$$(U)_{\substack{x=0 \\ T=0}} = kl \left[p \left(1 - \ln \frac{pa}{\ell v_0} \right) - \frac{2v_0}{a} \right]. \quad (34)$$

Таким образом, полученные выражения полностью описывают процесс установки анкера в породный массив при динамическом воздействии на его нижнее основание при условии, что верхний конец анкера (конец, внедряемый в породный массив) испытывает сопротивление P .

Выводы

1. Разработана математическая модель процесса установки в породный массив анкера с диаметром большим, чем диаметр направляющего шпура, при динамическом воздействии на анкер с учетом возникающих сопротивлений его перемещению по сечению и длине анкера.

2. Полученные зависимости позволяют выбрать параметры устройства, обеспечивающего необходимую динамическую нагрузку на анкер, скорость его движения в породный массив и безопасность ведения горных работ.

Список литературы / References

1. Булат, А.Ф. Опорно-анкерное крепление горных выработок угольных шахт / А.Ф. Булат, В.В. Виноградов. – Днепропетровск: Вильпо, 2010. – 372 с.

Bulat, A.F., Vinogradov, V.V. *Oporno-ankernoye krepneniye gornykh vyrabotok ugol'nykh shakht* [The support roof bolting of mine workings of coal

mines]. Dnepropetrovsk: Vil'po Publ., 2010. – 372 p.

2. Широков, А.П. Теория и практика применения анкерной крепи / А.П. Широков. – М.: Недра, 2012. – 381 с.

Shirokov, A.P. *Teoriya i praktika primeneniya ankernoyn krepi* [Theory and practice of the use of the roof bolting]. Moscow, Nedra Publ., 2012. – 381 p.

3. Ремезов, А.В. Анкерное крепление на шахтах Кузбасса и дальнейшее его развитие / А.В. Ремезов [и др.]. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2006. – 471 с.

Remezov, A.V. etc. *Ankernoynye krepneniye na shakhtakh Kuzbassa i dal'neysheye yego razvitiye* [The roof bolting at mines of the Kuznetsk Basin and its further development]. Kemerovo, Kuzbassvuzizdat Publ., 2006. – 471 p.

4. Пат. 55763 Украина, МПК Е 21 D 20/00. Способ установки анкера / Касьян Н.Н., Новиков А.О., Петренко Ю.А., Дрипан П.С., Шестопалов И.Н., Гладкий С.Ю., Выговский Д.Д.; заявитель и патентообладатель Донецкий национальный технический университет. – № u200901503; заявл. 23.02.2009; опубл. 25.06.2009; бюл. № 12. – 6 с.

Kas'yan, N.N., Novikov, A.O., Petrenko, Yu.A., Dripan, P.S., Shestopalov, I.N., Gladkiy, S.Yu., Vygovskiy, D.D. *Sposob ustanovki ankera* [The method of the roof-bolt setting]. Patent Ua, no. 55763, 2009.

5. Дворников, Л.Г. Анализ и обобщение закономерностей внедрения инструмента в горные породы при ударном воздействии / Л.Г. Дворников, И.А. Жуков // Матер. XVI науч.-практ. конф. по проблемам механики и машиностроения. – Новокузнецк: СибГИУ, 2006. – С. 225 – 229.

Dvornikov, L.G., Zhukov, I.A. *Analiz i obobshcheniye zakonmernostey vnedreniya instrumenta v gornyye porody pri udarnom vozdeystvii* [Analysis and generalization of conformities of penetration of the instrument into mine rocks by the shock action]. *Mater. XVI nauch.-prakt. konf. po problemam mekhaniki i mashinostroyeniya* [Materials of the 16th theoretical and practical conference on problems of mechanics and mechanical engineering]. – Novokuznetsk, Sib. GIU, 2006, pp. 225 – 229.

6. Леденев, В.В. Несущая способность и деформируемость оснований и фундаментов при сложных силовых воздействиях / В.В. Леденев. – Тамбов: ФГБОУ ВПО, 2015. – 253 с.

Ledenyev, V.V. *Nesushchaya sposobnost' i deformiruyemost' osnovaniy i fundamentov pri slozhnykh silovykh vozdeystviyakh* [Bearing capacity and deformability of foundations and bases by compound force actions]. Tambov, FGBOU VPO Publ., 2015, 253 p.

7. Тихонов, А.Н. Уравнения математической физики / А.Н. Тихонов, А.А. Самарский. – М.: Высш. шк., 2008. – 664 с.

Tikhonov, A.N., Samarskiy, A.A. *Uravneniya matematicheskoy fiziki* [Equations of mathematical physics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2008, 664 p.

Aleksandr Olegovich Novikov, Dr. Sci. (Tech.), prof.; e-mail: rpm2000avanek@mail.ru;

Pavel Sergeevich Dripan, senior lecturer; e-mail: dripanps@mail.ru

The State Educational Institution of Higher Occupational Education

“The Donetsk National Technical University”

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 301-03-09

THE MATHEMATICAL MODEL OF PENETRATION OF AN ANCHOR INTO THE MASSIF UNDER LOAD

Purpose. To ascertain the behavior of the process of setting the anchor of the greater diameter than the diameter of the directing borehole into the massif of a mine working of a coal mine by dynamic influence of resistances over it arising by movement of the anchor in the cross-section and along the length to substantiate the parameters of a fastener.

Methods. The theoretical method of investigations with the use of the longitudinal impact theory expounded in a work of Saint-Venant and corrected further by Boussinesq as well as of the results obtained in the works of Jung on spreading the deformation in objects by force actions.

Results. The dependences to determine location, movements, accelerations, deformations and strains of the anchor in the massif taking into account their geometrical dimensions and mechanical characteristics that allow choosing the parameters of the device ensuring the necessary dynamical anchor load and determining the velocity of its setting into the massif have been obtained.

Scientific novelty. The mathematical model of the process of setting the anchor of the greater diameter than the diameter of the directing borehole into the massif by dynamic influence over it subject to resistances to movement of the anchor in the cross-section and along the length arising what will guarantee the safe carrying-out of the mining operations and will reduce costs by anchoring the massif considerably.

Key words: *massif; anchor; directing borehole; dynamic load; deformations; strain; mathematical model.*

УДК 614.847.79

Владимир Михайлович Медгаус, нач. отд.; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru ;

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

Вадим Григорьевич Сынков, д-р техн. наук, науч. сотр.; e-mail: vasyn41@mail.ru

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

283046, Донецк, ул. Артёма, 157. Тел. (+38062) 332-78-51;

Дмитрий Валерьевич Реутов, ст. помощник начальника дежурной смены (по пожаротушению и проведению аварийно-спасательных работ) отдела оперативного реагирования, Центр управления в кризисных ситуациях МЧС ДНР; e-mail: reutov74@yandex.ua

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

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

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СПАСАТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА С ЧЕЛОВЕКОМ ПРИ ЕГО ПАДЕНИИ С ВЫСОТЫ

Цель. Изучить характеристики взаимодействия пневматического прыжкового спасательного устройства с человеком.

Методы. Теоретические исследования взаимодействия спасательного устройства с телом спасаемого.

Результаты. Из условия поглощения полной энергии падающего тела за счёт работы, затрачиваемой на истечение воздуха через отверстия, получены аналитические зависимости взаимодействия спасательного устройства с человеком.

Научная новизна. Впервые получены аналитические зависимости размера отверстий в пневматическом прыжковом спасательном устройстве, а также тормозного пути спасаемого и силы, действующей на тело до остановки.

Практическая значимость. Полученные зависимости могут быть использованы для расчёта параметров спасательного устройства, а также значений динамической перегрузки и тормозного пути.

Ключевые слова: высота спасения; пневматическое прыжковое спасательное устройство; отверстия; динамическая перегрузка; математическая модель.

Постановка проблемы. Спасение людей из многоэтажных зданий на высоте 10...20 м – одна из основных задач аварийно-спасательных подразделений МЧС ДНР, особенно актуальная при разрушении лестничных клеток от взрывов бытового газа и пожаров, когда перекрыты основные эвакуационные пути, а состояние придомовых территорий исключает использование автомобильных лестниц, автоподъёмников и спасательных рукавов.

В условиях быстроизменяющейся оперативной обстановки [1, 2] пневматические прыжковые спасательные устройства имеют преимущество перед другими средствами спасения: время приведения в рабочее состояние – до 5 мин, время готовности к повторному использованию 15 с, высокая мобильность и компактность при транспортировании, отсутствие необходимости в постоянной подкачке воздуха.

Для расширения области применения пневматического прыжкового спасательного устройства увеличивают размеры поверхности приземления и высоту прыжкового спасательного устройства, например SP 25 и SP 60, что позволяет повысить безопасность работ при спасении людей с большой высоты, но утяжеляет конструкцию; устройство становится более громоздким и менее мобильным. Таким образом, повышение безопасности работ при спасении людей с большой высоты при помощи спасательного устройства без изменения его габаритов – актуальная задача.

Цель исследования. На основе анализа параметров (табл. 1) спасательных устройств: ППСУ-20 производства ЗАО «Ярославль-Резинотехника» Ярославль, РФ; а также «Каскад-5», ЗАО НПП «РУСБАЛ» Москва, РФ; SP16, Vetter, Германия – изучить влияние параметров ППСУ на демпфирующую способность и динамические перегрузки.

Таблица 1

Основные параметры пневматических прыжковых спасательных устройств

Параметр	ППСУ-20	«Каскад-5»	SP-16
Рабочая высота, на которой спасают человека, м, не более	20	20	16
Диаметр вписанной окружности в поверхность приземления изделия, мм, не менее	4250	5000	3500
Высота изделия, мм, не менее	1800	2500	1700
Диаметр (ширина) изделия в транспортном положении, мм	450	940	550
Длина изделия в транспортном положении, мм	800	1000	900
Время приведения в рабочее состояние, мин	2...5	2...5	0,5
Время готовности к повторному использованию, с	15	15	10

Материалы и результаты исследований. Расчётная схема по определению характеристик действия тела массой m , кг, при падении с высоты H , м, на спасательное устройство высотой h , м, приведена на рис. 1: x – перемещение тела до остановки, м; E_I – полная энергия тела при касании поверхности приземления (начальное положение тела), Н·м; E_{II} – полная энергия тела в момент прекращения движения (конечное положение тела), Н·м.

Изменение энергии тела в конечном и начальном положениях погашается за счёт работы, затрачиваемой на истечение воздуха через отверстия спасательного устройства.

Так как тело в конечном положении не движется, то $E_{II} = 0$.

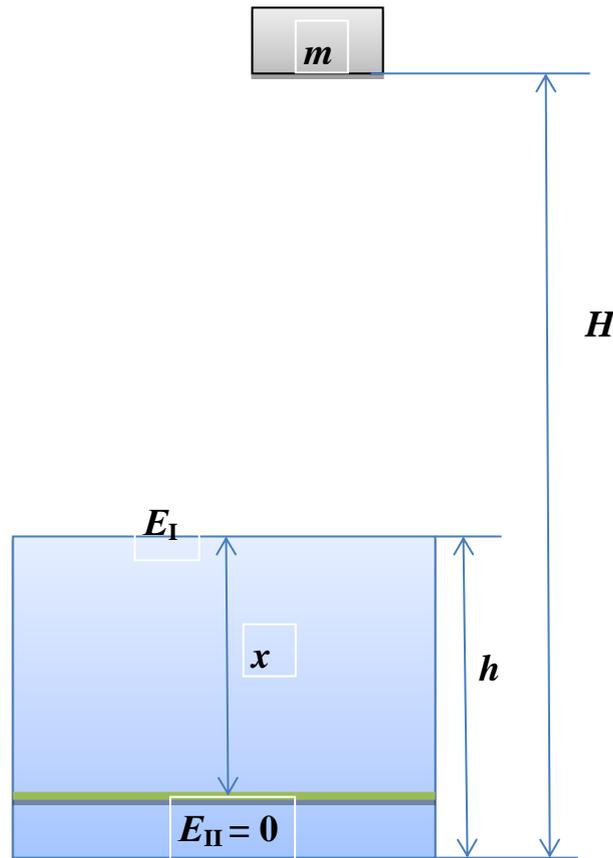


Рис. 1. Расчётная схема определения характеристик действия тела массой m при падении с высоты H на спасательное устройство высотой h

Полную энергию тела в начальном положении (при касании поверхности приземления спасательного устройства) E_I , Н·м, определяют по формуле

$$E_I = mgx + \frac{mv^2}{2}, \quad (1)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с²;

v – скорость тела, м/с.

После преобразований (1) с учётом третьего уравнения кинематики

$$E_I = mgx + mg(H - h). \quad (2)$$

Ускорение a , м/с², при движении тела по поверхности приземления устройства до остановки определяют по формуле [3]

$$a = g \frac{H-h}{x}. \quad (3)$$

Силу, действующую на тело до остановки F , Н, определяют по формуле [3]

$$F = mg \left(1 + \frac{H-h}{x} \right). \quad (4)$$

Значение динамических перегрузок n определяют по формуле [3]

$$n = 1 + \frac{H-h}{x}. \quad (5)$$

Время t_{Π} , с, перемещения тела при движении по поверхности приземления до остановки определяют из второго уравнения кинематики

$$t_{\Pi} \sqrt{2g(H-h)} - \frac{g(H-h)t_{\Pi}^2}{2x} - x = 0. \quad (6)$$

Уравнение (6) имеет единственное решение относительно t_{Π} :

$$t_{\Pi} = \frac{x\sqrt{2}}{\sqrt{g(H-h)}}. \quad (7)$$

Работу A , Н·м, затрачиваемую на истечение воздуха через отверстия, определяют по формуле

$$A = s_{\text{отв}} w t_{\Pi} (P_1 - P_2), \quad (8)$$

где $s_{\text{отв}}$ – площадь сечения боковых отверстий, м²;

w – скорость истечения воздуха через боковые отверстия, м/с;

t_{Π} – время истечения воздуха через боковые отверстия, с;

P_1, P_2 – давление во внутренней полости устройства и окружающей среде соответственно, Па.

Скорость истечения воздуха через отверстие w определяют по формуле

$$w = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}}, \quad (9)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³.

С учётом формулы (9) преобразуем (8)

$$A = s_{\text{отв}} t_{\Pi} \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho}} (P_1 - P_2) = s_{\text{отв}} t_{\Pi} \sqrt{\frac{2}{\rho}} (P_1 - P_2)^{3/2}. \quad (10)$$

Давление воздуха в устройстве до падения на него тела и в окружающем пространстве равно атмосферному. Изменение давления в устройстве происходит в результате действия силы на поверхность приземления

пневматического прыжкового спасательного устройства, определяемой из уравнения (4) и следующих соотношений:

$$P_1 - P_2 = \frac{2F}{S_8 + S_T} = \frac{2mg\left(1 + \frac{H-h}{x}\right)}{S_8 + S_T}, \quad (11)$$

где S_8 – площадь поверхности приземления пневматического прыжкового спасательного устройства, m^2 ;

S_T – площадь контакта тела спасаемого с поверхностью приземления, m^2 .

После преобразований с учётом выражений (10) и (11) получим

$$A = 4s_{\text{отв}} mg(x + H - h) \left(\frac{1}{S_8 + S_T}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{2m\left(1 + \frac{H-h}{x}\right)}{\rho(H-h)}}. \quad (12)$$

Тогда с учётом формул (2) и (12)

$$mgx + mg(H - h) = 4s_{\text{отв}} mg(x + H - h) \left(\frac{1}{S_8 + S_T}\right)^{3/2} \sqrt{\frac{2m\left(1 + \frac{H-h}{x}\right)}{\rho(H-h)}}. \quad (13)$$

После преобразований выразим площадь сечения боковых отверстий из уравнения (13)

$$s_{\text{отв}} = \frac{(S_8 + S_T)^{3/2}}{4} \sqrt{\frac{\rho(H-h)}{2m\left(1 + \frac{H-h}{x}\right)}}. \quad (14)$$

Задав x как значение максимального перемещения тела до прекращения движения, из (14) получаем значение площади сечения боковых отверстий $s_{\text{отв}}$.

При фиксированном значении $s_{\text{отв}}$ из уравнения (14) находим значение x :

$$x = \frac{32ms_{\text{отв}}^2(H-h)}{(S_8 + S_T)^3 \rho(H-h) - 32ms_{\text{отв}}^2}. \quad (15)$$

Полученные зависимости позволяют определить ускорение замедленного движения a (3), силу F (4), действующую на тело при замедлении движения, динамическую перегрузку при падении спасаемого на устройство n (5), время до остановки тела $t_{\text{п}}$ (7), и позволяют сравнить их с допустимыми значениями динамических перегрузок (рис. 2) [3].

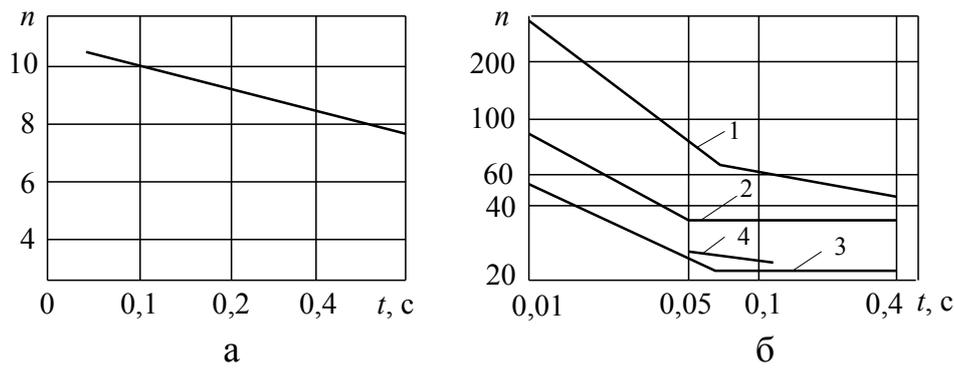


Рис. 2. Допустимые значения ударных перегрузок в зависимости от времени действия в направлении «таз – голова» (а) и «грудь – спина» (б):

- 1 – предел добровольной переносимости; 2 – выраженные физиологические реакции;
3 – слабые физиологические реакции; 4 – предел добровольной переносимости в направлении «бок – бок»

Расчёт параметров взаимодействия спасательного устройства с человеком при падении его на поверхность приземления с учётом параметров пневматического прыжкового спасательного устройства (диаметр отверстий 0,6 м) выполнен по приведенным выше зависимостям для следующих условий: масса тела 100 кг, рост 1,85 м, площадь касания тела устройства 0,925 м². По результатам расчёта (табл. 2) можно сделать вывод, что значения рассчитанных динамических перегрузок n , действующих в период времени $t_{п}$ (6-й и 7-й столбцы таблицы), отвечают допустимым значениям динамических перегрузок и классифицируются [3] как вызывающие слабые физиологические реакции в направлении действия «грудь – спина». При падении человека с высоты более 10 м значение динамических перегрузок будет выше допустимых (см. рис. 2), действующих в направлении «таз – голова». Сухожилия выдерживают перегрузки менее 6,5 [3], поэтому при падении с таких высот спасаемому необходимо группироваться так, чтобы обеспечить касание устройства плашмя спиной или животом.

Таблица 2

Расчёт параметров взаимодействия спасательного устройства с человеком при падении на поверхность приземления

Высота падения H , м	Высота спасательного устройства h , м	Перемещение тела по поверхности приземления до остановки x , м	Ускорение движения тела по поверхности приземления до остановки a , м/с ²	Сила, действующая на тело при замедлении движения F , Н	Значение динамических перегрузок n	Время перемещения тела по поверхности приземления до остановки $t_{п}$, с	Площадь сечения боковых отверстий $S_{отв}$, м ²	Диаметр бокового отверстия $d_{отв}$, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	1,8	0,8735	208,4	21835,7	21,8362	0,092	1,13	0,6
18	1,8	0,8622	187,9	19788,2	19,7884	0,096	1,13	0,6

Окончание табл. 2

Высота падения H , м	Высота спасательного устройства h , м	Перемещение тела по поверхности приземления до остановки x , м	Ускорение движения тела по поверхности приземления до остановки a , м/с ²	Сила, действующая на тело при замедлении движения F , Н	Значение динамических перегрузок n	Время перемещения тела по поверхности приземления до остановки $t_{пз}$, с	Площадь сечения боковых отверстий $S_{отв}$, м ²	Диаметр бокового отверстия $d_{отв}$, м
1	2	3	4	5	6	7	8	9
16	1,8	0,8688	163,5	17345,2	17,3451	0,103	1,13	0,6
14	1,8	0,8776	139,0	14902,2	14,9023	0,112	1,13	0,6
12	1,8	0,8901	114,6	12459,2	12,4594	0,125	1,13	0,6
10	1,8	0,9095	90,2	10016,2	10,0161	0,142	1,13	0,6
8	1,8	0,9432	65,7	7573,3	7,5732	0,169	1,13	0,6
6	1,8	1,0169	41,3	5130,3	5,1303	0,222	1,13	0,6
4	1,8	1,3039	16,8	2687,3	2,6873	0,393	1,13	0,6
3,5	1,8	1,5791	10,8	2076,5	2,0765	0,542	1,13	0,6

Выводы. Разработана математическая модель характеристик взаимодействия тела массой m при падении с высоты H на пневматическое прыжковое спасательное устройство. Рассчитанные динамические перегрузки отвечают допустимым значениям и классифицируются как вызывающие слабые физиологические реакции в направлении действия «грудь-спина».

Список литературы / References

1. Смогунов, В.В. Анализ надёжности и качества устройств спасения / В.В. Смогунов, Е.И. Широков, И.Б. Широков // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. – СПб., 2011. – Т. 1. – С. 378 – 380.

Smogunov, V.V., Shirokov, Ye.I., Shirokov, I.B. *Analiz nadyezhnosti i kachestva ustroystv spaseniya* [Analysis of reliability and quality of life-saving appliances]. *Nadyezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma* [Reliability and quality: proceedings of the International symposium]. Saint Petersburg, 2011, vol. 1, pp. 378 – 380.

2. Sprungkissen SP / Fa. Vetter = Прыжково-спасательные устройства [Электронный ресурс]. URL: https://www.vetter.de/vetter_emergency/Rettungsprodukte/Sprungkissen/Sprungkissen+SP+16+_+SP+25-p-3301.html (дата обращения: 27.01.2017).

Sprungkissen SP / Fa. Vetter = *Pryzhkovo-spasatel'nyye ustroystva* [Hopping-life-saving appliances] [Electronic resource]. https://www.vetter.de/vetter_emergency/Rettungsprodukte/Sprungkissen/Sprungkissen+SP+16+_+SP+25-p-3301.html (accepted: 27.01.2017).

3. Дубровский, В.И. Биомеханика / В.И. Дубровский, В.Н. Фёдорова. – М.: ВЛАДОС-ПРЕСС, 2003. – 672 с.

Dubrovskiy, V.I., Fyodorova, V.N. *Biomekhanika* [Biomechanics]. Moscow, VLADOS-PRESS Publ., 2003. – 672 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым.
Дата поступления рукописи 05.03.2018

Vladimir Michaylovich Medgaus, head of department; e-mail: vladimir_medgaus@mail.ru ;
Anatoly Anatolyevich Klychkov, scientific associate; e-mail: anatoly.klichkov@yandex.ru ;
Vadim Grigoryevich Synkov, Dr. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: vasyn41@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-51;
Dmitry Valeryevich Reutov, chief assistant of the shiftman on duty (on fighting the fires and carrying-out the
emergency rescue operations), department of efficient response, Centre of control in crisis situations
of the MChS DPR; e-mail: reutov74@yandex.ua
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

INTERACTION OF A LIFE-SAVING APPLIANCE WITH A MAN BY HIS FALL FROM A HEIGHT

Purpose. To study the characteristics of interaction of the pneumatic hopping life-saving appliance with the man.

Methods. Theoretical investigations of the interaction of the life-saving appliance with the body of the man being rescued.

Results. The analytical dependences of the interaction of the life-saving appliance with the man have been obtained from the condition of absorption of the full energy of the falling body at the expense of the work being consumed for flow of air through openings.

Scientific novelty. The analytical dependences of the size of the openings in the pneumatic hopping life-saving appliance as well of the braking distance of the man being rescued and the force having an effect on the body until it comes to a standstill have been obtained for the first time.

Practical value. The dependences obtained may be used to calculate the parameters of the life-saving appliance as well as the values of the acceleration and braking distance.

Key words: *life-saving height; pneumatic hopping life-saving appliance; openings; acceleration; mathematical model.*

УДК 504.5:[622.693.26:622.822.22]

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

Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: v.orlikova.69@gmail.com;

Олег Петрович Пашковский, мл. науч. сотр.; e-mail: kingston-4@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-82*

ВЛИЯНИЕ ПОРОДНЫХ ОТВАЛОВ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ

Цель. Изучение процесса выделения газообразных вредных веществ в атмосферу из горящих породных отвалов угольных предприятий и установление зависимостей удельных массовых концентраций этих веществ от термодеструкции породной массы отвалов для последующего определения валовых выбросов.

Методика. Лабораторные исследования образцов горящих породных отвалов Донбасса, основанные на термодеструкции породной массы и анализе газовой пробы.

Результаты. Для изучения процесса выделения газообразных вредных веществ горячей породной массы отвалов проведены лабораторные исследования и получены данные количественного анализа этих веществ. В диапазоне фиксированных температур исследованы концентрации наиболее распространенных вредных веществ, выделяющихся из породных отвалов в атмосферу (оксид и диоксид углерода, оксиды азота, оксид серы, сероводород). Определена температура максимального образования газов, оказывающих удушающее и отравляющее действие на организм человека. Установлены аналитические зависимости удельной массовой концентрации газообразных вредных веществ от температуры породной массы отвалов и проведен их анализ.

Научная новизна. Получены зависимости удельных массовых концентраций газообразных вредных веществ от термодеструкции породной массы отвалов. Определены максимальные значения удельных концентраций при соответствующей температуре породной массы отвалов по каждому газообразному веществу, выделяющемуся в атмосферу из очагов горения.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при мониторинге теплового состояния породных отвалов угольных предприятий. Определение максимально возможной удельной массовой концентрации газообразных вредных веществ в зависимости от температуры породной массы отвалов в очагах горения позволит провести количественный анализ выделения газообразных вредных веществ в атмосферу.

Ключевые слова: *породная масса отвалов; самовозгорание; концентрация; вредное вещество; термодеструкция.*

Постановка проблемы. В результате деятельности угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий Донбасского региона и Кузбасса происходит формирование породных отвалов, представляющих техногенную опасность. К негативным последствиям породных отвалов относят ухудшение состояния атмосферы, сокращение площади сельскохозяйственных земель, загрязнение почвенного покрова, развитие эрозионных процессов, изменение гидрологического и гидрогеологического режима района и др. [1, 2].

Особую опасность представляют горящие породные отвалы, активно выделяющие в атмосферу вредные вещества. По данным 2015 г. о закрытых и закрывающихся шахтах в Донецком регионе, 69 из 177 отвалов – горящие,

а в Луганском регионе 34 из 244 отвалов – горящие [2]. Среди продуктов горения породного отвала, загрязняющих атмосферу, выделяют оксиды азота, диоксид серы, сероводород, оксид и диоксид углерода. Интенсивность выбросов загрязняющих веществ зависит от наличия в породе горючей массы, технологии формирования отвалов и времени их существования. Например, загрязняющие вещества от горящего недействующего породного отвала шахты «Зенковская» (Кузбасс) представлены взвешенными веществами, сдуваемыми с поверхности, масса которых в 2005 г. была 0,788 т в год или 0,048 г/с, и газообразными веществами: SO₂ 3,99 т, CO₂ 39,95 т, NO₂ 0,4 т, H₂S 2,0 т в год. На фоне CO₂ выделение остальных компонентов значительно ниже, однако их учет и контроль крайне необходим для оценки санитарно-гигиенических условий окружающей среды. Так, например, 1 т серы, содержащейся в породной массе, при сгорании образует 2 т оксида серы. Если считать, что ежегодно перегорает около 1 млн т породы с объемной долей серы в ней до 1 %, то это эквивалентно образованию 20 тыс. т сернистого ангидрида. Для сравнения: суммарный выброс SO₂ всеми стационарными и передвижными источниками по Кузбассу 160 тыс. т [1, 3].

Самовозгорание породной массы отвалов – сложный физико-химический процесс, зависящий от размера, формы и условий теплообмена на границе газ – твердое вещество, а также от дисперсности, пористости и влажности этого вещества в твердой фазе. С увеличением дисперсности и пористости породной массы отвалов резко возрастает общая поверхность частиц в объеме и соответственно увеличивается количество молекул, реагирующих с кислородом в слое дисперсного вещества. При этом возрастает количество выделяемой теплоты в единице объема, что способствует возникновению самовозгорания при более низких температурах окружающей среды. Кроме того, важную роль в процессе самонагрева и самовозгорания веществ органического и неорганического происхождения играет влага, которая содержится в самом веществе и в окружающей атмосфере. В общем случае влияние влаги на критические условия самовозгорания зависит от температуры окружающей среды, относительной влажности воздуха и условий массопереноса паров влаги в окружающем пространстве. Так как в породной массе отвалов содержатся горючие вещества в виде угля, сростков породы с углем, углистых сланцев, аржиллитов, соединений серы (в основном в виде пирита), древесины, вышеуказанные факторы способствуют протеканию химических реакций окисления, что приводит к самонагреванию и как следствие самовозгоранию породных отвалов.

Анализ последних исследований. Самовозгорание веществ в породных отвалах носит очаговый характер, а его развитие происходит за счет последующего расширения участков горения. В процессе взаимодействия породной массы отвалов с окружающей средой и ее самонагрева ускоряется выветривание породообразующих минералов, их разрушение, замещение некоторых элементов и образование новых минералов, таких, как лимонит,

гетит, гидрогетит и др. [2, 4]. Этот процесс сопровождается химическими и биохимическими реакциями окисления пирита, которые протекают с выделением сероводорода. Происходит прогревание поверхностного слоя горных пород и обогащение его серой, зарождение очагов тления. Сформировавшиеся внутри горной массы участки с температурой около 260 °С вызывают самовоспламенение паров сероводорода и метана. Происходит увеличение пористости поверхностного слоя за счет выноса газовыми потоками мелких фракций, смещение фронта горения в глубь скопления пород по мере формирования отвала и проникновения внутрь атмосферного воздуха. Дальнейшее повышение температуры приводит к разложению минералов и углефицированного вещества с выделением оксида и диоксида углерода, азота, оксида серы, аммиака, а также образованием сероуглерода (CS₂), оксид-сульфида углерода (COS) и тиофена (C₄H₄S).

Концентрации вредных веществ определяют в соответствии с Временным методическим руководством по выявлению источников загрязнения атмосферы, производству замеров выбросов вредных веществ на предприятиях угольной промышленности и нормативными документами, однако полученные данные различаются между собой.

Цель исследований. Возникла необходимость в проведении исследований газообразных вредных веществ, образующихся при термодеструкции породной массы отвалов, и установлении зависимости их концентрации от температуры.

Результаты исследований. Проведены лабораторные исследования вредных газов, выделяющихся при различных температурах породной массы отвалов, и разработана рабочая методика определения концентрации газообразных вредных веществ на основе нагревания пробы породной массы отвалов до определенной температуры (термодеструкции), отборе и анализе газовой пробы. При термоокислительной деструкции регистрировали выделение горючих (оксид углерода) и негорючих (диоксид углерода) веществ. Кроме распространенных газов, определяли наличие вредных веществ, оказывающих удушающее (оксиды азота) и отравляющее (оксид серы, сероводород) действие на организм человека. Концентрацию вредных веществ определяли в диапазоне фиксированных температур от 100 до 500 °С. На основании полученных данных устанавливали зависимости концентраций вредных газов, образующихся при термодеструкции породной массы отвалов, от температуры испытания.

Пробу породной массы отвалов отбирали из партии вещества, характеризующейся однородностью органолептических признаков (цвета, запаха, внешнего вида) и количественной определенностью массы партии. На горящем породном отвале угольного предприятия партию вещества отбирали и формировали путем отбора точечных проб породной массы отвалов. На отвале с помощью тепловизора выявляли участки поверхности, где расположены очаги горения (температура породной массы отвалов на глубине до 2,5 м

от поверхности превышает 80 °С) и самонагрева (соответственно – не превышает 80 °С). По контуру очага горения (самонагрева) бурили скважины и измеряли температуру с целью выявления зоны нагретой породной массы отвалов, в которой температура на глубине 0,5 м от поверхности не превышает 45 °С. Данную зону условно делили на восемь равных по площади частей и производили точечный отбор проб породной массы отвалов.

Из каждой части отбирали порцию пробы с глубины от 0,1 до 0,2 м. Размер кусков породы не превышал 30 мм. Масса каждой порции пробы была не менее 0,8 кг, а общая масса партии – не менее 6,5 кг.

Отобранную партию вещества помещали в двухслойный полиэтиленовый пакет или плотно закрывающуюся емкость и вкладывали этикетку со следующей информацией: номер пробы, дата и время отбора, место отбора. Из партии вещества методом квартования отбирали среднюю пробу массой не менее 5 кг, отражающую качество всей партии.

Большие куски породы измельчали до размера не более 20 мм. Среднюю пробу вещества просеивали через сита и отбирали для анализа фракцию от 0 до 20 мм, после чего фракцию взвешивали. Масса средней пробы породы была не менее 0,5 кг.

Исследования выделяющихся вредных газов проведены на лабораторной установке термического разложения породной массы отвалов, представленной на рис. 1.

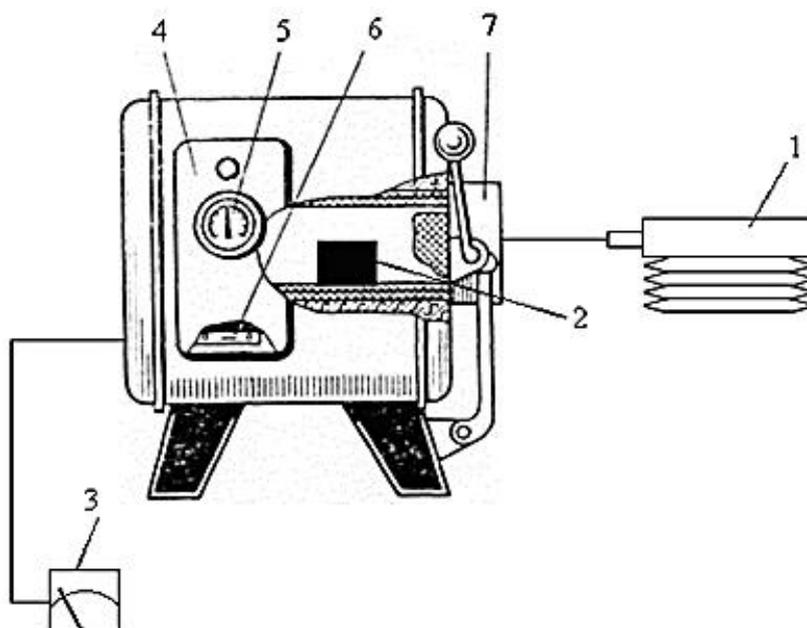


Рис. 1. Схема установки термического разложения породной массы отвалов:

- 1 – аспиратор газовой смеси; 2 – образец породы; 3 – милливольтметр;
4 – блок управления; 5 – реле температуры; 6 – подключение к сети переменного тока 220 В;
7 – муфельная электропечь

Порядок выполнения измерений заключается в следующем. В муфельную электропечь, предварительно нагретую до заданной температуры, помещают исследуемую пробу вещества. Массу пробы определяют индивидуально, в зависимости от заданной температуры муфельной электропечи и с учетом диапазона концентраций газов, измеряемых химическими газоопределителями. Пробу вещества в печи при заданной температуре выдерживают в течение 30 мин. Затем проводят количественный анализ выбранных газов с помощью химических газоопределителей ГХ-М, принцип действия которых основан на качественной реакции индикаторной массы с анализируемым газом.

При выполнении измерений фиксируют температуру и давление в лаборатории для приведения объема образующейся газовой смеси к стандартным условиям при температуре воздуха 20 °С и давлении 101,3 кПа.

Массовую концентрацию исследуемого вредного вещества C_M , мг/м³, образующуюся при заданной температуре термодеструкции пробы породы, рассчитывают по формуле

$$C_M = \frac{C_o M_a P T_o}{100 V_M P_o T_L}, \quad (1)$$

где C_o – объемная доля вредного вещества, %;

M_a – молярная масса вредного вещества, мг/моль;

P – давление в лаборатории, кПа;

T_L – температура в лаборатории, °С;

P_o – давление при стандартных условиях, равное 101,3 кПа;

T_o – температура при стандартных условиях, равная 20 °С;

V_M – молярный объем газа, равный 0,0224 м³/моль.

С учетом массы анализируемой пробы породы рассчитывают удельную массовую концентрацию исследуемого вредного вещества C_y , мг/м³, по формуле

$$C_y = C_M / m, \quad (2)$$

где m – масса анализируемой пробы породы, кг.

В результате проведенных лабораторных исследований различных горящих породных отвалов Донбасса установлены функциональные зависимости концентрации выделяющегося вредного газа от температуры $C = f(T)$, представленные на рис. 2.

Анализ зависимостей показывает, что интенсивность выделения оксида и диоксида углерода из породной массы отвалов резко увеличивается при температуре свыше 230 °С (рис. 2, а и б). Данные зависимости описывают уравнения вида $C_y(\text{CO}) = 10^{-11} t^{6,31}$ и $C_y(\text{CO}_2) = 7 \cdot 10^{-6} t^{4,43}$.

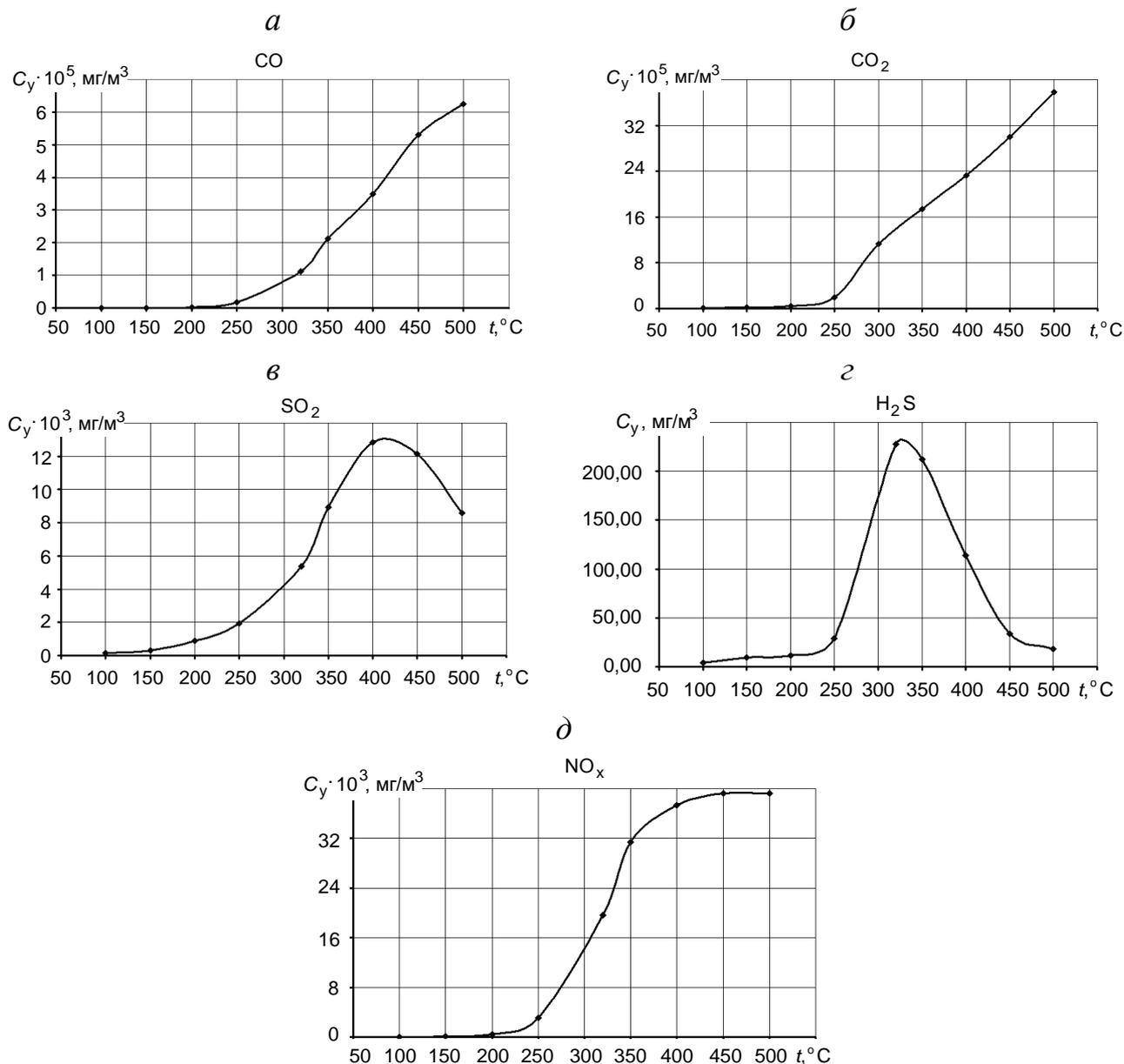


Рис. 2. Зависимость удельной массовой концентрации вредных газов от температуры породной массы отвалов:

a – оксид углерода; *б* – диоксид углерода; *в* – оксид серы;
г – сероводород; *д* – оксиды азота

Рост концентрации оксида серы (рис. 2, в) наблюдается до температуры 400 °С, а затем идет ее постепенное снижение. Более точно данный график можно представить двумя зависимостями: до температуры 400 °С изменение концентрации SO₂ описывается уравнением вида $C_y = 3 \cdot 10^{-5} t^{3,32}$, а ее снижение уравнением $C_y = 2 \cdot 10^8 t^{-1,64}$. Как и в предыдущем случае, для зависимости концентрации сероводорода (рис. 2, г) отмечен максимум при температуре 330 °С, после чего наблюдаем ее резкий спад. Этот график также описывается двумя уравнениями: рост концентрации H₂S представлен зависимостью

$C_y = 0,59e^{0,02t}$, а снижение концентрации $C_y = 0,005t^2 - 4,92t + 1344,1$. Для оксидов азота, образующихся при термодеструкции породной массы отвалов, установлено увеличение концентрации до 450 °С, затем кривая выравнивается, при этом дальнейший рост концентрации незначителен. Данная зависимость приведена на рис. 2, д и аппроксимирована уравнением $C_y = 3 \cdot 10^{-13} t^{6,41}$. Следует отметить, что при достижении температуры породной массы отвалов 230...250 °С наблюдается резкое увеличение концентрации всех исследуемых веществ, что соответствует началу периода разложения породной массы отвалов. Установленные максимумы концентраций SO₂, H₂S и NO_x подтверждают правильность выбранного диапазона температур для исследования породной массы отвалов и позволяют оценить массовую концентрацию вредного вещества, выделяющегося из 1 кг самонагревающейся породы.

Выводы. Проведены лабораторные исследования вредных газов (оксида углерода, диоксида углерода, оксида серы, сероводорода, оксидов азота), выделяющихся при термодеструкции породных отвалов угольных предприятий; определены концентрации вышеуказанных вредных газов при различных температурах; установлены зависимости удельной массовой концентрации газов от температуры породной массы отвалов и проведен их анализ.

Список литературы / References

1. Корчагина, Т.В. Совершенствование методики оценки воздействия подземной добычи коксующихся углей на окружающую среду: дис. ... канд. техн. наук / Т.В. Корчагина. – Тула, 2008. – 154 с.

Korchagina, T.V. *Sovershenstvovaniye metodiki otsenki vozdeystviya podzemnoy dobychi koksuyushchikhsya ugley na okruzhayushchuyu sredu: dis. ...kand. tekhn. nauk* [Improvement of the methods of impact assessment of the underground production of coking coals on the environment: dr. tech. sci. diss.]. Tula, 2008, 154 p.

2. Васильева, И.В. Актуальные вопросы мониторинга породных отвалов угольных шахт и охраны окружающей среды / И.В. Васильева // Минеральные ресурсы Украины. – 2015. – № 3. – С. 39 – 45.

Vasil'yeva, I.V. *Aktual'nyye voprosy monitoringa porodnykh otvalov ugol'nykh shakht i okhrany okruzhayushchey sredy* [Actual questions of the monitoring of waste dumps of coal mines and environmental protection]. *Mineral'nyye resursy Ukrainy – Mineral resources of the Ukraine*, 2015, no. 3, pp. 39 – 45.

3. Вайсман, Я.И. Разработка технологии консервации терриконигов в целях снижения их негативного воздействия на окружающую среду и сохранения ресурсного потенциала / Я.И. Вайсман, М.Ф. Гайдай // Вестник

ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. – 2016. – Т. 15, № 19. – С. 175 – 184.

Vaysman, Ya.I., Gayday, M.F. *Razrabotka tekhnologii konservatsii terrikonikov v tselyakh snizheniya ikh negativnogo vozdeystviya na okruzhayushchuyu sredu i sokhraneniya resursnogo potentsiala* [Development of the technology for conservation of spoil heaps in order to reduce their negative impact on the environment and preserve resource potential]. *Vestnik PNIPU. Geologiya. Neftgazovoye i gornoye delo – Bulletin of the PNIPU. Geology. Oil and gas work and mining*, 2016, vol. 15, no.19, pp. 175 – 184.

4. Корчагина, Т.В. Проблемы оценки вредного воздействия на природную среду угледобывающими предприятиями / Т.В. Корчагина // Проблемы теории, истории и практики в современных научных исследованиях. Экономика, государство и право, педагогика и психология: материалы науч.-практ. конф. вузов Кузбасса. – Кемерово: ООО «ИИТ», 2005. – Т. 1. – С. 56 – 58.

Korchagina, T.V. *Problemy otsenki vrednogo vozdeystviya na prirodnyuyu sredu ugledobывayushchimi predpriyatiyami* [Problems of harmful environmental impact assessment by coal producers]. *Problemy teorii, istorii i praktiki v sovremennykh nauchnykh issledovaniyakh. Ekonomika, gosudarstvo i pravo, pedagogika i psikhologiya: materialy nauch.-prakt. konf. vuzov Kuzbassa* [Problems of theory, history and practice in up-to-date scientific investigations. Economics, state and law, pedagogics and psychology: materials of the academic and research conference of institutes of higher education of the Kuznetsk Basin]. Kemerovo, ООО “ИИТ” Publ., 2005, vol. 1, 214 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 07.02.2018

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

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

Oleg Petrovich Pashkovskiy, research assistant; e-mail: kingston-4@mail.ru

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 332-78-82

INFLUENCE OF WASTE DUMPS ON THE ENVIRONMENT

Purpose. Study of the process of release of gaseous harmful substances into the atmosphere from the burning waste dumps of coal enterprises and establishment of dependences of the specific mass concentrations of these substances on thermal degradation of the dump mass for the following determination of gross emissions.

Methods. Laboratory investigations of the samples of the burning waste dumps of the Donets Basin based on thermal degradation of the dump mass and analysis of the gas sample.

Results. To study the process of release of the gaseous harmful substances of the burning bed of the dumps the laboratory investigations have been carried out, and the data of the quantitative analysis of these substances have been obtained. The concentrations of the most widespread harmful substances emitting from the waste dumps into the atmosphere (carbon oxide and carbon dioxide, nitrogen oxides, sulfur oxide,

hydrogen sulfide) have been investigated over the range of the fixed temperatures. The temperature of the maximum generation of the gases exerting an asphyxiating and toxic impact on the human organism has been determined. The analytical dependences of the specific mass concentration of the gaseous harmful substances on the temperature of the bed of the dumps have been ascertained, and their analysis has been carried out.

Scientific novelty. The dependences of the specific mass concentrations of the gaseous harmful substances on thermal degradation of the bed of the dumps have been determined. The maximum values of the specific concentrations at the corresponding temperature of the bed of the dumps according to each gaseous substance emitting into the atmosphere from the heat sources have been estimated.

Practical value. The results obtained may be used by monitoring the thermal state of the waste dumps of the coal enterprises. The determination of the maximum possible specific mass concentration of the gaseous harmful substances depending on the temperature of the bed of the dumps in the heat sources will allow carrying-out the quantitative analysis of the emission of the gaseous harmful substances into the atmosphere.

Keywords: *bed of the dumps; spontaneous combustion; concentration; harmful substance; thermal degradation.*

Требования к оформлению статьи

К рассмотрению принимаются статьи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи статьи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступлением 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура статьи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и электронная почта, название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;
- реферат (от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель; методика; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (5–15 слов) на русском и английском языках, реферат не должен повторять названия статьи;
- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации;
- раздел журнала для размещения статьи.

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи;
- описание методики (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Объем статьи, включая текст, таблицы, рисунки, должен быть от 7 до 9 страниц. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Рисунки (диаграммы, фото и др.) располагаются вместе с текстом в местах ссылок на них. Подписи к рисункам должны содержать нумерацию в порядке размещения в тексте и объяснительную подпись. Недопустимо включать подписи в сам рисунок.

Формулы в статьях должны быть набраны с помощью редактора формул (внутренний редактор формул в редакторе Microsoft Word for Windows или Microsoft Equation), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом. Нумерация формул, на которые есть ссылка в тексте, – справа в скобках. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы – в книжной ориентации, они должны иметь тематические заглавия и номера, фон таблицы другим цветом не выделяют. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не более 15 источников с датой их издания не ранее чем за 10 лет и количеством самоссылок до 20 %) приводится в порядке упоминания в тексте.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Ответственность за содержание статьи несет автор. Предоставленные материалы не возвращаются.

Статьи, которые не отвечают требованиям редакции, не рассматриваются.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал

2018, № 3(55)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик О.А. Шестакова

Верстальщик Т.Н. Филатова

Учредитель и издатель

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

Поступившие на издание статьи проходят рецензирование

Подписано к использованию 29.06.2018.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+ 38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 2,42 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 2 июля 2018 г.