



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 2(54)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2017

УДК 614.8"363"+355.244.2+622.867

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 2(54). – 112 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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

Подписан к печати по рекомендации ученого совета НИИГД «Респиратор» (протокол № 2 от 30.03.2017).

Зарегистрирован Министерством информации ДНР.

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

Свидетельство о регистрации сетевого издания ААА № 000121 от 20.04.2017.



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

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD “RESPIRATOR”

Scientific-technical journal

No. 2(54)

Published quarterly

Found in 1970

Donetsk
2017

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2017. – No. 2(54). – 112 p.

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

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

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

Editorial board:

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

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

Approved for printing according to the reference of the academic council of the NIIGD "Respirator" (proceeding no. 2 from 30.03.2017).

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ**TABLE OF CONTENTS*****I. Пожарная и промышленная
безопасность*****Кострубицкий А.А., Агеев В.Г.,
Зинченко И.Н.**Математическая модель развития
пожара в помещении

7

**Богомаз А.М., Коляда А.Ю.,
Дикенштейн И.Ф.**Параметры устройства для
дымоосаждения в аварийных
помещениях

20

Орликова В.П., Головченко Е.А.Самовозгорание угля в местах
складирования на поверхности

31

Гуржий В.В., Зинченко Е.О.Характер оплавления проводников
при коротком замыкании

38

Тимошенко Д.А.Ранцевые огнетушители для
ликвидации лесных пожаров

45

***II. Безопасность в чрезвычайных
ситуациях*****Пашковский П.С., Жильцов А.Н.,
Жильцов Н.П.**Образование паров аммиака при
аварийных выбросах

51

**Греков С.П., Старикова И.Г.,
Глушенко К.В.**Расчет коэффициентов теплоотдачи
в слое зернистого вещества

59

**Высоцкий С.П., Ермакова Д.И.,
Степаненко Т.И.**Очистка сточных вод от тяжелых
металлов

69

I. Fire and industrial safety**Kostrubitskiy A.A., Ageyev V.G.,
Zinchenko I. N.**A mathematical model of development
of a fire in a premise**Bogomaz A.M., Kolyada A.Yu.,
Dikensteyn I.F.**Parameters of a device for smoke
precipitation in emergency premises**Orlikova V.P., Golovchenko Ye.A.**Spontaneous combustion of coal in storing
places on the surface**Gurzhii V.V., Zinchenko Ye.O.**Character of the washing of conductors
by the short circuit**Timoshenko D.A.**Backpack fire extinguishers for fighting
the forest fires***II. Safety in emergencies*****Pashkovskiy P.S., Zhiltsov A.N.,
Zhiltsov N.P.**Generation of ammonia vapors
by accidental escapes**Grekov S.P., Starikova I.G.,
Hlushenko K.V.**Calculation of heat-transfer coefficients
in the layer of a granular substance**Vysotskiy S.P., Yermakova D.I.,
Stepanenko T.I.**Sewage treatment from heavy
metals

Пeftибай Г.И., Галухин Н.А., Курбацкий Е.В. Параметры барьерной перемычки для изоляции пожарных участков	78	Peftibay G.I., Galukhin N.A., Kurbatskiy Ye.V. Parameters of a barrier stopping for isolation of fire districts
III. Охрана труда		III. Labor protection
Сердюк А.И., Ялалова М.М. Безопасность при использовании кремнефтористоводородного электролита для свинцевания	89	Serdyuk A.I., Yalalova M.M. Safety when using the fluosilicic electrolyte for leading
Подгородецкий Н.С. Приоритетные направления в организации безопасной производственной деятельности	96	Podgorodetskiy N.S. Priority directions in the organization of the safe production activity
Момот Н.В., Плахотников И.А., Костямин Ю.Д., Кузнецов А.С. Хирургическое лечение пострадавших с осколочно-огнестрельными ранениями мягких тканей	103	Momot N.V., Plakhotnikov I.A., Kostyamin Yu.D., Kuznetsov A.S. Surgical treatment of the victims with missile gunshot wounds of soft tissues
Требования к оформлению статьи	110	Requirements of execution of an article

I. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 614.841.45:001.891.573

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

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

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

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

Игорь Николаевич Зинченко, канд. техн. наук, замнач. отд.; e-mail: zinstar@mail.ru

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

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

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА В ПОМЕЩЕНИИ

Цель. Разработка математической модели развития пожара в помещении для прогнозирования аварийных ситуаций.

Методика основана на применении классических уравнений тепломассообмена с учётом термического расширения газов.

Результаты. Рассмотрена модель горения твёрдых материалов с учётом их термического разложения, фильтрации горючих газов в сторону воздушного потока и увеличения площади горения. Предложена математическая модель тепломассообмена в самом помещении и в его стенах с учётом расходования кислорода на горение. Получена аналитическая зависимость интенсивности горения твёрдого материала, хорошо согласующаяся с экспериментальными данными. Разработан численный метод расчёта температуры в помещении и в его стенах в момент развития пожара и при догорании различных материалов.

Научная новизна. Усовершенствована математическая модель, повышена точность расчётов и эффективность системы водяного пожаротушения.

Практическая значимость. Полученные результаты можно использовать при прогнозе последствий развития пожара и выборе параметров его тушения диспергированной водой.

Ключевые слова: пожар; горение; помещение; стены; температура; концентрация кислорода; математическая модель; численный метод; прогноз.

Постановка проблемы. Моделирование тепломассообмена при пожаре представляет собой проблему, решением которой занимаются многие учёные [1 – 7]. Реальный пожар как неконтролируемое горение [2] является сложным, до конца не изученным, нестационарным и трёхмерным теплофизическим процессом, сопровождающимся изменением химического состава и параметров газовой среды помещения. Турбулентный конвективный и лучистый тепломассообмен в очаге горения с химическими реакциями, теплообмен между раскаленными газами и ограждающими конструкциями помещения осложняются тепломассообменом с окружающей средой через различные проёмы, что приводит к существенной неоднородности температуры, скорости и концентрации продуктов горения в помещении.

Для прогнозирования динамики изменения во времени параметров газовой среды, прогревания ограждающих конструкций и теплового или иного воздействия пожара на людей и материальные ценности необходимо совершенствование модели горения и развития пожара.

Анализ последних исследований. Существует большое количество интегральных, зонных или полевых математических моделей развития пожара на различных объектах [1 – 7]. В зонных моделях [1] помещение условно разбивают на отдельные зоны, в которых для описания теплообмена используют соответствующие уравнения законов сохранения. Размеры и количество зон выбирают таким образом, чтобы в пределах каждой из них неоднородности температурных и других параметров газовой среды были возможно минимальными, или из каких-то других предположений, определяемых задачами исследований и расположением горючего материала. При выборе только одной зоны модель называется интегральной.

Наиболее подробное описание процессов теплообмена при пожаре в помещении дают полевые (трёхмерные) модели [1]. Основное их достоинство – то, что искомыми параметрами являются поля температур, скоростей, давлений, концентраций компонентов газовой среды и частиц дыма по всему объёму помещения.

Однако интегральные, зонные и полевые модели термогазодинамики пожара имеют ряд существенных недостатков [1, 2, 5], связанных с практическими сложностями их реализации и с недостаточностью информации о параметрах конвективного теплообмена и лучистого теплопереноса при пожаре.

Таким образом, необходимо дальнейшее совершенствование теории процессов горения и теплообмена при пожаре, в первую очередь, на основе физического моделирования. Однако большая стоимость и трудоёмкость проведения экспериментальных исследований на современном уровне делает актуальной задачу математического моделирования.

Цель исследований. Разработка математической модели развития пожара в помещении при различной пожарной нагрузке.

Результаты исследований. Пожар в помещении сопровождается изменением состава и параметров газовой среды, заполняющей помещение. Газовая среда в помещении с проёмами, соединяющими его с наружным окружением и коридором, как объект исследования представляет собой открытую термодинамическую систему (рис. 1).

Состояние газовой среды при пожаре в помещении характеризуется полями локальных термодинамических параметров состояния. Однако его можно характеризовать и с помощью среднеобъёмных термодинамических параметров состояния, связанных между собой уравнением, вытекающим из условия существования локального равновесия. С помощью среднеобъёмных параметров состояния можно проследить общие закономерности процесса

развития пожара, выявить его наиболее характерные особенности и обуславливающие их факторы.

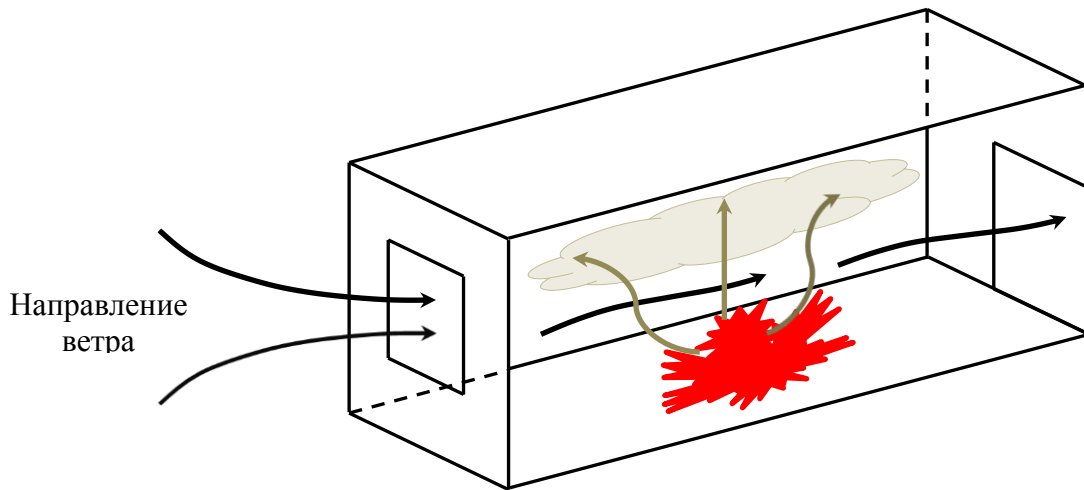


Рис. 1. Поступление воздуха в помещение через оконный проём при пожаре

Для описания процессов развития и распространения пожаров в помещениях используем уравнение сохранения энергии по трём направлениям и при одной скорости вдоль направления движения воздуха [1]:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q, \quad (1)$$

где ρ – плотность газов, кг/м³;

c – удельная теплоёмкость газов при постоянном давлении, Дж/(кг·К);

T – температура, К;

τ – время, с;

x, y, z – координатные оси вдоль длины, ширины и высоты помещения соответственно, м;

u – продольная скорость движения воздуха, м/с;

λ – коэффициент турбулентной и радиационной теплопроводности, Вт/(м·К);

q – интенсивность источника теплоты при горении, Вт/м³.

К уравнению переноса теплоты добавим ещё уравнение переноса массы, в данном случае кислорода, в одном направлении [1]:

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(\rho D_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\rho D_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\rho D_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) - M, \quad (2)$$

где C – объёмная доля кислорода, %;
 D_x, D_y, D_z – коэффициенты турбулентной диффузии кислорода в направлении соответствующих координат, м²/с;
 M – интенсивность источника поглощения кислорода при горении, кг/(с·м³).

Поскольку температура на стенах помещения неизвестна, рассмотрим ещё уравнение теплопроводности внутри стен. Без источника теплоты и при отсутствии движения воздуха внутри стен уравнение теплопроводности имеет вид [1]

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial \theta}{\partial z} \right), \quad (3)$$

где θ – температура внутри стен, К.

Представим в конечных разностях производные по координатам в уравнении (1) и получим

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\Delta T}{\Delta x} \right) = \frac{\Delta}{\Delta x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\Delta}{\Delta y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q. \quad (4)$$

Будем рассматривать процессы теплообмена в зоне горения на её длине $\Delta x = l$. Тогда, пренебрегая термодиффузией по сравнению с напорным переносом теплоты и принимая на входе в зону горения температуру нормальной, $T = T_0$, будем иметь

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{T - T_0}{l} \right) = \frac{\Delta}{\Delta y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\Delta}{\Delta z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q. \quad (5)$$

Примем шаги по высоте h , м, и ширине b , м, зоны горения равными $\Delta y = h/2$ и $\Delta z = b/2$. Согласно работе [6], примем потоки теплоты на стенах помещения равными

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha(T - T_c); \quad -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha(T - T_c), \quad (6)$$

где α – коэффициент теплообмена смеси газов со стенками помещения, Вт/(м²·К);

T_c – температура стенки, К.

Подставляя равенства (6) в уравнение (5), получим

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{T - T_0}{l} \right) = \frac{\alpha}{\Delta y} (T_c - T) + \frac{\alpha}{\Delta z} (T_c - T) + q. \quad (7)$$

Принимая $\Delta y = \Delta z$, $S = 4\Delta y \Delta z$, $\Pi = 8 \Delta y$, представим уравнение (7) в несколько ином виде:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{T - T_0}{l} \right) = \frac{\alpha S_c}{V} (T_c - T) + q, \quad (8)$$

где S_c – площадь поверхности стен помещения, м²;

V – объём зоны горения, м.

К уравнению (8) добавим уравнение состояния смеси газов [6]

$$P = \rho R T, \quad (9)$$

где P – давление, Па;

R – газовая постоянная, Па·м³/(кг·К).

При дозвуковых потоках газов давление меняется незначительно, на несколько десятков или сотен паскалей, по отношению к атмосферному давлению, равному $P_0 = 10^5$ Па, эти колебания ничтожно малы. Поэтому можно принять $P \approx P_0$, где P_0 – давление при нормальных условиях. В этом случае, так как $R = P_0 / \rho_0 T_0$, уравнение состояния газов (9) можно представить в виде

$$\rho / \rho_0 = T_0 / T. \quad (10)$$

Подставляя это выражение в уравнение (8), получим

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial T}{\partial \tau} + \frac{\rho u}{\rho_0} \frac{T - T_0}{l} = \frac{\alpha S_c}{\rho_0 c V} (T_c - T) + \frac{q}{\rho_0 c}. \quad (11)$$

Согласно уравнению (9), с ростом температуры плотность будет уменьшаться, но тогда должна увеличиваться скорость воздуха. Поэтому массовая скорость будет постоянной величиной:

$$\tilde{y} = \rho u / \rho_0. \quad (12)$$

Разделив левую и правую части уравнения (11) на T_0 , с учётом выражения (12) получим

$$\frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\bar{T} - 1}{l} = \frac{\alpha S_c}{c \rho_0 V} (\bar{T}_c - \bar{T}) + \frac{q}{c \rho_0 T_0}. \quad (13)$$

Рассмотрим подробнее уравнение переноса массы кислорода (2). Пренебрегая диффузией кислорода в разных направлениях по сравнению с его переносом потоком воздуха, вместо уравнения (2) получим

$$\rho \left(\frac{\partial C}{\partial \tau} + u \frac{\partial C}{\partial x} \right) = -M. \quad (14)$$

Разделим левую и правую части уравнения (14) на плотность при нормальных условиях ρ_0 и с учётом уравнения (10) будем иметь

$$\frac{T_0}{T} \frac{\partial C}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\partial C}{\partial x} = -M / \rho_0. \quad (15)$$

Очевидно, что и в полученном уравнении переноса массы (15) учтено термическое расширение газов. В ряде работ этот фактор не рассматривается.

Выразим производную по длине выработки в конечных разностях и представим уравнение (15) в виде

$$\frac{dC}{d\tau} = [\tilde{u}(C_0 - C)/l - M / \rho_0] \frac{T}{T_0}. \quad (16)$$

Предположим, что интенсивность поглощения кислорода в зоне горения зависит от его концентрации:

$$M = M_0 C, \quad (17)$$

где M_0 – коэффициент пропорциональности, характеризующий скорость выгорания топлива, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$.

Подставляя выражение (17) в уравнение (16), будем иметь

$$\frac{d\bar{C}}{d\tau} = \left[\tilde{u}(1 - \bar{C})/l - M_0 \bar{C} / \rho_0 \right] \frac{T}{T_0}. \quad (18)$$

Преобразуем теперь уравнение (3). Поскольку нас интересует прогревание стен помещения вглубь, пренебрежём в уравнении (3) первым и вторым слагаемым в правой части и вместо уравнения (3) получим

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}, \quad (19)$$

где z – координата, направленная в глубину стен, м.

Представим правую часть уравнения (19) в конечных разностях:

$$\frac{d\theta}{d\tau} = a \frac{T_0 - 2\theta + T_c}{\Delta z^2}, \quad (20)$$

где $a = \lambda/(\rho c)$ – коэффициент температуропроводности, м²/с.

Разделив левую и правую часть уравнения на T_0 , представим его в безразмерном виде

$$\frac{d\bar{\theta}}{d\tau} = 2a \frac{1 - 2\bar{\theta} + \bar{T}_c}{\Delta z^2}, \quad (21)$$

где $\bar{\theta} = \theta/T_0$ – безразмерная температура стен помещения.

Примем, что температура на стенах помещения определяется как среднее арифметическое температур в глубине и в потоке воздуха: $T_c = 0,5(T + \theta)$. Подставляя это выражение в уравнение (21), получим

$$\frac{d\bar{\theta}}{d\tau} = a \frac{2 - 3\bar{\theta} + \bar{T}}{\Delta z^2}. \quad (22)$$

Аналогично, выражая температуру на стенах помещения через температуры в глубине стен и в помещении, представим уравнение (13) в виде

$$\frac{1}{\bar{T}} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} + \tilde{u} \frac{\bar{T} - 1}{l} = \frac{\alpha S_c}{2c\rho_0 V} (\theta - \bar{T}) + \frac{q}{c\rho_0 T_0}. \quad (23)$$

Входящая в уравнение (23) интенсивность источника поглощения кислорода при горении тесно связана с функцией теплового источника и может быть представлена в виде

$$M_0 = \delta q / H_c, \quad (24)$$

где δ – эмпирическая константа.

Подставляя формулу (24) в уравнение (18), получим

$$\frac{d\bar{C}}{d\tau} = [\tilde{u}(1 - \bar{C})/l - \delta q / (\rho_0 C_0 H_c)] \bar{T}. \quad (25)$$

Полученная система уравнений (22), (23) и (25) позволяет моделировать процессы развития пожаров в помещениях различного назначения.

Функция источника тепловыделения при пожаре может быть представлена, в отличие от эмпирической [2], в виде аналитической зависимости

$$q/q_m = (\tau/\tau_m)^3 \exp[3(1 - \tau/\tau_m)], \quad (26)$$

где q_m – максимальная интенсивность тепловыделения в очаге пожара, кВт/м³;
 τ_m – время выхода тепловыделения на максимум, с.

Для определения положения максимума тепловыделения предложена в работе [2] зависимость

$$\tau_m = 32 - 8,1G^{3,2} \exp(-0,92G), \quad (27)$$

где G – пожарная нагрузка, кг/м².

Анализ предлагаемой формулы (27) и графика (рис. 2, штриховая линия) показывает, что они не отражают физической сущности процесса. Во-первых, при отсутствии пожарной нагрузки ($G = 0$) время максимума должно равняться нулю ($\tau_m = 0$). Во-вторых, не может положение максимума температуры не превышать значения 32 мин. Диапазон изменения пожарной нагрузки в экспериментах [2] находился в узких пределах 0,8...14,4 кг/м². Данные исследований [1 – 4] показывают, что максимум температуры может наступать через 1 и через 2 ч.

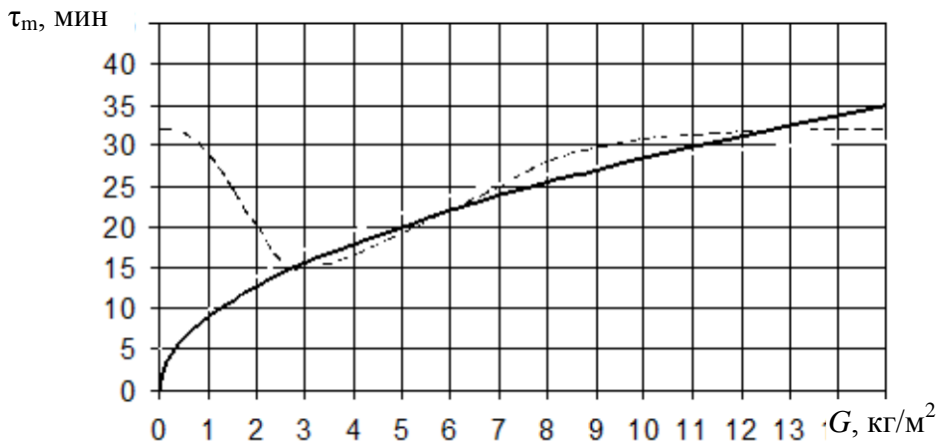


Рис. 2. Кривые зависимости времени максимума температуры от пожарной нагрузки:

штриховая линия – по формуле (27); сплошная линия – по формуле (29)

Поэтому следует предположить с физической точки зрения, что максимум температуры наступает при полностью развитом пожаре, когда пламя охватывает максимально возможную площадь горения. Тогда справедливо равенство

$$\rho_r h (\nu \tau_m)^2 = \chi S_m G, \quad (28)$$

где ρ_r – плотность горючего материала, кг/м³;

h – толщина пожарной нагрузки, м;

S_m – максимальная площадь пожарной нагрузки, м².

Решая формулу (28) относительно времени максимума, получим (см. рис. 2)

$$\tau_m = \frac{1}{\nu_r} \sqrt{\frac{\chi S_m G}{\rho_r h}}. \quad (29)$$

При расчёте формула (29) была приведена к простому виду

$$\tau_m = 9\sqrt{G}. \quad (30)$$

Таким образом, для расчётов не может быть использована не только формула положения максимума тепловыделения (27), но и формула (31) для определения максимальной температуры [2]:

$$T_m = T_0 + 224G^{0,528}. \quad (31)$$

Анализ результатов расчёта и их сравнение с известными многочисленными данными показывают, что предложенная эмпирическая зависимость (31) может быть использована только в диапазоне тех данных, при которых были проведены эксперименты, то есть в диапазоне пожарных нагрузок $G = 0,8 \dots 14,1$ кг/м². Так, при пожарных нагрузках $G = 50 \dots 100$ кг/м², как в работе [1], температура не может достигать 1800...2600 °С, чего не наблюдалось ни в одном из многочисленных экспериментов, проведенных за рубежом или НИИГД «Респиратор». Поэтому необходимы дальнейшие теоретические исследования тепломассообменных процессов при пожарах аналитическими и численными методами.

Для численного моделирования развития пожара в помещении представим уравнение (22) в конечных разностях в неявном виде

$$\bar{\theta}^{n+1} = \bar{\theta}^n + \frac{a\Delta\tau}{2\Delta z^2} (\bar{T}^n - 3\bar{\theta}^{n+1} + 2). \quad (32)$$

Решим полученное равенство (32) относительно температуры стен на новом временном слое и получим

$$\bar{\theta}^{n+1} = \frac{\bar{\theta}^n + \bar{a}(\bar{T}^n + 2)}{1 + 3\bar{a}}, \quad (33)$$

где $\bar{a} = \frac{a\Delta\tau}{2\Delta z^2}$ – безразмерный коэффициент теплопроводности в стенах.

Представим в конечных разностях уравнение теплопроводности (23). Используем для расчётов схему с конечными разностями против потока в неявном виде:

$$\frac{1}{\bar{T}^n} \frac{\bar{T}^{n+1} - \bar{T}^n}{\Delta\tau} + \tilde{u} \frac{\bar{T}^{n+1} - 1}{l} = \frac{\alpha S_c}{2c\rho_0 V} (\bar{\theta}^n - \bar{T}^{n+1}) + \frac{q^n \bar{C}}{\rho_0 c T_0}. \quad (34)$$

Решим уравнение (34) относительно температуры на новом временном слое и получим

$$\bar{T}^{n+1} = \bar{T}^n \frac{1 + Cu + \bar{\gamma}_1 \bar{\theta}^n + \bar{q}^n \bar{C}^n}{1 + \bar{T}^n (Cu + \bar{\gamma}_1)}, \quad (35)$$

где $Cu = \tilde{u}\Delta\tau/l$ – схемное число Куранта;

$\bar{\gamma}_1 = \frac{\alpha S_c \Delta\tau}{2c\rho_0 V}$ – безразмерный коэффициент теплообмена со стенками канала;

$\bar{q}^n = \frac{q^n \Delta\tau}{\rho_0 c_p T_0}$ – относительная интенсивность тепловыделения в зоне горения.

Из формулы (35) следует, что при отсутствии источника тепловыделения температура не меняется.

Аналогично представим согласно выражению (25) уравнение переноса кислорода в конечных разностях в виде

$$\frac{\Delta\bar{C}}{\Delta\tau} = [\tilde{u}(1 - \bar{C})/l - \delta q/(\rho_0 C_0 H_c)] \bar{T}. \quad (36)$$

Решая уравнение (36) относительно концентрации кислорода на новом временном слое, получим

$$\bar{C}^{n+1} = \frac{\bar{C}^n + \bar{T}^n(\text{Cu} + \bar{\gamma}_2)}{1 + \bar{T}^n(\text{Cu} + \bar{\gamma}_2 + \delta\bar{q}^n)}. \quad (37)$$

Из формулы (37) следует, что при отсутствии химических реакций ($\delta = 0$) концентрация кислорода в зоне горения не будет меняться даже при наличии тепловыделения, например, от наружного источника.

Таким образом, получены три уравнения (34), (35) и (37) для исследования развития пожара. Анализ полученных уравнений показывает, что они абсолютно устойчивы, так как не содержат в числителе слагаемых со знаком «минус». Кроме того, первое и второе уравнения впервые учитывают термическое расширение газов.

Выводы. Разработана математическая модель развития пожара в помещении при различной пожарной нагрузке, впервые учитывающая термическое расширение газов и выгорание вещества. Математическая модель позволяет прогнозировать все возможные ситуации при пожарах для поиска наиболее эффективных и безопасных способов ликвидации аварии и спасения людей и обосновывать применение тех или иных решений при разработке систем противопожарной защиты различных помещений.

Список литературы/ References

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

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

2. Молчадский, И.С. Пожары в помещениях / И.С. Молчадский. – М.: ВНИИПО, 2005. – 456 с.

Molchadskiy, I.S. *Pozhary v pomeshcheniyakh* [Fires in premises]. Moscow, VNIIPPO Publ., 2005, 456 p.

3. Касьянов, Н.А. Математическое моделирование развития пожара в помещении / Н.А. Касьянов, Д.В. Михайлов // Вісник СумДУ. – Суми: СумДУ, 2004. – Вип. 61, № 2. – С. 213 – 216.

Kasyanov, N.A., Mikhaylov, D.V. *Matematicheskoye modelirovaniye razvitiya pozhara v pomeshchenii* [The mathematical modeling of development of a fire in a premise]. *Visnyk SumDU* [Bulletin of the SumDU]. Sumy, SumDU, 2004, issue 61, no. 2, pp. 213 – 216.

4. Михайлов, Д.В. Компьютерное моделирование пожара как средство совершенствования пожарной безопасности различных объектов /

Д.В. Михайлов // Вісник СНУ ім. В. Даля. – Луганськ: СНУ ім. В. Даля, 2006. – Ч. 2. – Т. 100, № 6. – С. 104 – 109.

Mikhaylov, D.V. *Komp'yuternoye modelirovaniye pozhara kak sredstvo sovershenstvovaniya pozharnoy bezopasnosti razlichnykh ob'yektov* [The computer modeling of a fire as a means of improvement of the fire safety of various objects]. *Visnyk SNU im. V. Dalya* [Bulletin of the V. Dal' SNU]. Luhansk, SNU im. V. Dalya Publ., 2006, part 2, vol. 100, no. 6, pp. 104 – 109.

5. Тищенко, Е.А. Интегральная модель среднеобъёмной температуры в помещении в начальной стадии пожара / Е.А. Тищенко, Ю.П. Дробнич // Проблемы пожарной безопасности. – Харьков: НУГЗУ, 2008. – Вып. 25. – С. 181 – 184.

Tishchenko, Ye.A., Drobnych, Yu.P. *Integral'naya model' sredneob'yemnoy temperatury v pomeshchenii v nachal'noy stadii pozhara* [The integral model of the average volume temperature in a premise at the initial stage of a fire]. *Problemy pozharnoy bezopasnosti* [Problems of fire safety]. Kharkov, NUGZU Publ., 2008, issue 25, pp. 181 – 184.

6. Кошмаров, М.Ю. Моделирование динамики начальной стадии пожара в помещениях, зданиях и сооружениях при воспламенении горючей жидкости: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03 / М.Ю. Кошмаров. – Москва, 2004. – 201 с.

Koshmarov, M.Yu. *Modelirovaniye dinamiki nachal'noy stadii pozhara v pomeshcheniyakh, zdaniyakh i sooruzheniyakh pri vosplamenenii goryuchey zhidkosti* [Modeling the dynamics of the initial stage of a fire in premises, buildings and installations by inflammation of a combustible liquid]. *Diss. kand. tekhn. nauk: 05.26.03*. [Cand. techn. sci. diss.: 05.26.03]. Moscow, 2004, 201 p.

7. Теплофизические процессы в горных выработках при экзогенных пожарах / С.П. Греков, С.Н. Смоланов, Н.С. Почтаренко, А.А. Березовский // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк: ООО «Лебедь», 2000. – С. 39 – 46.

Grekov, S.P., Smolanov, S.N., Pochtarenko, N.S., Berezovskiy, A.A. *Teplofizicheskiye protsessy v gornykh vyrabotkakh pri ekzogennykh pozharakh* [Thermal physic processes in mine workings by open fires]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, "Lebed" LLC Publ., 2000, pp. 39 – 46.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.С. Гребёнкиным.
Дата поступления рукописи 13.02.2017

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

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

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

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

Igor Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech.), deputy head of department; e-mail: zinstar@mail.ru

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

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

A MATHEMATICAL MODEL OF DEVELOPMENT OF A FIRE IN A PREMISE

Purpose. Working-out the mathematical model of development of the fire in the premise to forecast emergency situations.

The methods are grounded on the use of the classical heat-mass exchange equations taking into account the thermal dilatation of gases.

Results. The model of combustion of solid materials with due regard of their thermal decomposition, filtration of combustible gases aside the air flow and extension of the burning area is considered. The mathematical model of heat-mass exchange in the premise itself and within its walls is proposed taking into account the oxygen consumption for burning. The analytical dependence of intensity of combustion of the solid material that is well consistent with the experimental data has been received. The numerical method of computing the temperature in the premise and within its walls at the moment of development of the fire and by after-combustion of various materials has been worked out.

Scientific novelty. The mathematical model is improved, the precision of calculations and efficiency of a water fire-fighting system are raised.

Practical value. One can use the results received by the forecast of consequences of development of the fire and choice of parameters of its fighting with water dispersed.

Keywords: *fire; combustion; premise; walls; temperature; oxygen concentration; mathematical model; numerical method; forecast.*

УДК 614.842.612:[614.841.13:621.63]

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

Андрей Юрьевич Коляда, нач. отд.; e-mail: kolyada1980@mail.ru;

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

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-70

ПАРАМЕТРЫ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ДЫМООСАЖДЕНИЯ В АВАРИЙНЫХ ПОМЕЩЕНИЯХ

Цель. Определение параметров установки дымоподавления тонкораспыленной водой.

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

Результаты. Получены зависимости для определения интенсивности и времени подачи тонкораспыленной воды в аварийное помещение в целях повышения видимости.

Научная новизна. Установлена зависимость дальности видимости в аварийном помещении от интенсивности подачи воздушно-водяной смеси, размеров капель распыленной воды, суммарного коэффициента захвата дымовых частиц каплями и размеров помещения.

Практическая значимость. Внедрение разработанной установки в пожарно-спасательных подразделениях МЧС позволит повысить эффективность их действий, снизит угрозу жизни спасаемых людей и ведущих боевые действия пожарных.

Ключевые слова: *частицы дыма; дымоосаждение; дымосос; концентрация частиц; видимость; расход воды; суммарный коэффициент захвата.*

Постановка задачи. Каждая оперативно-тактическая единица пожарно-спасательных подразделений МЧС ДНР имеет на вооружении переносной пожарный дымосос. Существуют нормативные документы, предъявляющие к дымососам общие технические требования и регламентирующие методы их испытаний [1], также есть большое количество дымососов, выпускаемых зарубежными фирмами. Однако методики применения их на пожаре нет. Более того, практика показывает, что данный вид оборудования применяют при тушении пожаров и проведении спасательных операций крайне редко и весьма неохотно, особенно при варианте работы дымососа на нагнетание свежего воздуха в задымленное помещение. В этом отношении отечественные пожарные солидарны с европейскими, которые рассматривают раннее тактическое вентилирование как стратегию, чреватую дальнейшими проблемами [2]. Скорость горения и распространения пожара увеличивается при подаче дополнительного воздуха в аварийное помещение. Европейский подход предполагает стабилизацию внутреннего состояния и использование тактики изоляции пожара или его локализации как приоритетной.

Противоположной точки зрения придерживаются американские пожарные, считающие приоритетной тактику вентилирования здания на ранней стадии развития пожара для улучшения условий работы пожарных и обеспечения

жизнедеятельности оставшихся внутри здания людей. Использование переносных пожарных дымососов делает возможным создание искусственного избыточного давления внутри здания для снижения высокой температуры и удаления дыма и токсичных продуктов горения, что обеспечивает необходимые условия продвигающимся внутри здания пожарным.

Эта тактика также имеет свои негативные стороны. Установлено, что дополнительная подача воздуха в здание может вызвать явление «обратной тяги», вспышку пламени или даже небольшой взрыв [3].

Кроме того, следует учитывать, что пожарные автомобили, первыми прибывающие к месту вызова, это чаще всего пожарные автоцистерны и автомобили первой помощи, не укомплектованные переносными дымососами. Поэтому использование дымососов на ранней стадии невозможно. Запаздывание их использования приводит к тому, что количество продуктов горения, выделяющихся при пожаре, превышает технические возможности дымососов. Поэтому для создания благоприятных условий (увеличение видимости и снижение температуры) для работы подразделений оперативно-спасательной службы необходимы более эффективные средства и нетрадиционные пути использования существующих дымососов. Один из таких путей – разработка устройства для подачи воздушно-водяного потока в задымленное помещение. При этом твердые частицы дыма оседают вследствие увлажнения, температура в помещении снижается, увеличивается видимость, уменьшается концентрация некоторых растворимых в воде токсичных продуктов горения. Тем самым снижается угроза жизни спасаемых людей и выполняющих боевые действия пожарных.

Анализ последних публикаций. В работах [3 – 6] описаны конструкция, принцип действия устройства по подаче распыленной воды в задымленное помещение. Однако теоретическое обоснование параметров этих устройств отсутствует.

В работе [7] описана математическая модель процесса осаждения твердых частиц дыма каплями распыленной воды, однако параметры устройства не рассчитаны. В работах [6, 8, 9] приведены экспериментальные данные по осаждению дымовых частиц, но конкретные параметры установки не определены.

Цель исследований. Необходимо рассчитать параметры разработанной установки с учетом распределения твердых частиц дыма, их концентрации, аэродинамики газожидкостных потоков в аварийных помещениях, необходимых условий видимости.

Материалы и результаты исследований. НИИГД «Респиратор» разработана установка дымоподавления с использованием тонкораспыленной воды УДТВ (рис. 1). УДТВ представляет собой интегрированное устройство, совмещающее функции осаждения и абсорбции продуктов горения, снижения температуры в задымленных помещениях и повышения видимости. При

обнаружении пожарно-спасательным подразделением в аварийном помещении очага пожара УДТВ может быть использована для его тушения.

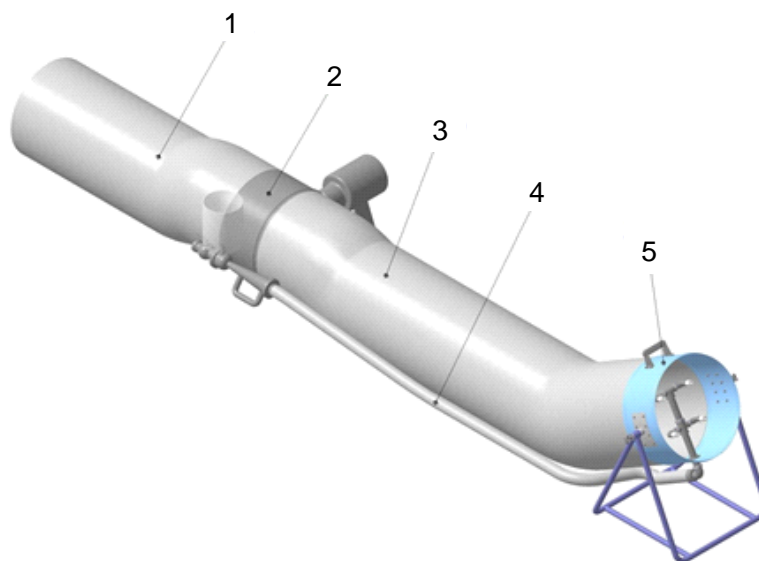


Рис. 1. Установка дымоподавления с использованием тонкораспыленной воды и добавок поверхностно-активных веществ:

1 – всасывающий рукав; 2 – пожарный дымосос; 3 – напорный рукав;
4 – пожарный рукав; 5 – приставка

УДТВ состоит из переносного пожарного дымососа производительностью 15000 м³/ч и приставки для распыления воды с 1...4 распылителями. Применяют центробежно-струйные распылители РВ-10. В УДТВ используют комбинированный способ распыления – это объединение пневматического и гидравлического способов (пнеумогидравлическое распыление), что позволяет снизить затраты энергии.

УДТВ используют вместе с пожарной автоцистерной АЦ-40 (130) 63 Б с насосом ПН-40У, создающим напор воды, которая поступает в установку. Напор воды 0,3...0,4 МПа.

Размер создаваемых капель воды зависит от давления, под которым воду подают к насадкам-распылителям, и от напора, создаваемого дымососом.

Таким образом, УДТВ может создать воздушно-водяной поток с диаметром капель от 70 до 350 мкм и расходом воды от 1,3 до 5,2 л/с (4,68...18,72 м³/ч).

Рассмотрим упрощенную математическую модель дымоосаждения, предложенную в работе [7]. Пусть объем орошаемой мелкораспыленной водой зоны в аварийном помещении общим объемом V , м³, равен w , м³. Количество частиц дыма в орошаемой зоне в момент времени τ , с, равно N_τ . Изменение этого количества происходит за счет генерации новых дымовых частиц очагом пожара, находящимся вне зоны орошения, удаления частиц дыма потоком

воздуха, нагнетаемого дымососом, и осаждения частиц дыма каплями воды, распыляемой установкой:

$$N_q(\tau + d\tau) - N_q(\tau) = (N_{\text{ген}} - N_{\text{уд}} - N_{\text{осажд}})d\tau, \quad (1)$$

где $N_q(\tau + d\tau)$, $N_q(\tau)$ – количество частиц дыма в моменты времени $\tau + d\tau$ и τ , с, соответственно;

$N_{\text{ген}}$ – количество удаляемых ежесекундно частиц дыма;

$N_{\text{осажд}}$ – количество осаждаемых каплями воды частиц дыма.

В соответствии с [7] имеем

$$N_{\text{ген}} = \frac{3\dot{M}w\alpha}{4\pi d_q^3 \rho_q V}, \quad (2)$$

где \dot{M} – интенсивность дымообразования, кг/с;

d_q – диаметр дымовых частиц, м;

ρ_q – плотность дымовых частиц, кг/м³;

α – массовая доля дымовых частиц в общей массе выделяемого очагом пожара дыма;

$$N_{\text{уд}} = \frac{N_q Q}{w}, \quad (3)$$

где Q – расход воздуха, создаваемый дымососом, м³/с;

$$N_{\text{осажд}} = \frac{3v_k G_{\text{ж}} N_q \eta_{\Sigma}}{16w \rho_{\text{ж}} d_k}, \quad (4)$$

где v_k – скорость капель распыленной воды, м/с;

$G_{\text{ж}}$ – масса распыленной воды, ежесекундно поступающей в зону орошения, кг;

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

d_k – диаметр капель воды, м;

η_{Σ} – суммарный коэффициент эффективности осаждения дымовых частиц каплями распыленной воды.

При этом полагаем, что осажденными считаются все частицы дыма, захваченные движущимися каплями воды.

Из уравнения (1) с учетом (2), (3) и (4) получаем

$$dN_q = \left(\frac{3\dot{M}w\alpha}{4\pi d_q^3 \rho_q V} - \frac{N_q Q}{w} - \frac{3v_k G_{\text{ж}} N_q \eta_{\Sigma}}{16w \rho_{\text{ж}} d_k} \right) d\tau, \quad (5)$$

или интегрируя при начальном условии $N_q = N_{q0}$ при $\tau = 0$, получаем

$$N_{\text{ч}} = \left(N_{\text{ч}0} - \frac{a}{b} \right) e^{-b\tau} + \frac{a}{b}, \quad (6)$$

где обозначены комплексы a , b , c^{-1} :

$$\begin{cases} a = \frac{3\dot{M}w\alpha}{4\pi d_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} V}; \\ b = \frac{3\nu_{\text{к}} G_{\text{ж}} \eta_{\Sigma}}{16w\rho_{\text{ж}} d_{\text{к}}} + \frac{Q}{w}. \end{cases} \quad (7)$$

Переходя к концентрациям, получаем

$$n_{\text{ч}} = \left(n_{\text{ч}0} - \frac{a}{bw} \right) e^{-b\tau} + \frac{a}{bw}. \quad (8)$$

Поскольку в первом приближении можно принять, что оптическая плотность дыма, D , м, пропорциональна концентрации дымовых частиц, то из работы [10] для дальности видимости V_s , м, берем соотношение

$$V_s = 2,68n_{\text{ч}}^{-1,036}. \quad (9)$$

Для расчета параметров устройства необходимо определить коэффициент η_{Σ} .

На частицу дыма действуют силы тяжести, инерции и аэродинамические силы. При сближении частицы с каплей на расстояние $1,5 \dots 2,0 d_{\text{к}}$ начинают действовать электростатические силы, а для мелких частиц диаметром $d_{\text{ч}} < 5$ мкм при небольших скоростях движения проявляются диффузионные силы.

Для эффективного улавливания витающих частиц дыма диспергированной водой необходимо выполнение следующих стадий:

- встреча с каплей на пути своего движения;
- соприкосновение частицы с каплей;
- смачивание и захват частицы каплей;
- соединение капли с захваченными частицами (рис. 2).

Первая стадия происходит при сближении капли с частицей дыма до расстояний, на которых начинают действовать молекулярные силы. На этой стадии на частицу действуют инерционные, электростатические и аэродинамические силы.

Вторая стадия предполагает соприкосновение частицы с каплей. Основное влияние при этом оказывают адгезионные, инерционные и молекулярные силы.

На третьей стадии происходит процесс смачивания и захвата частицы каплей. На этой стадии играют роль силы адгезии и инерции, а захват осуществляется под воздействием гравитационных сил.

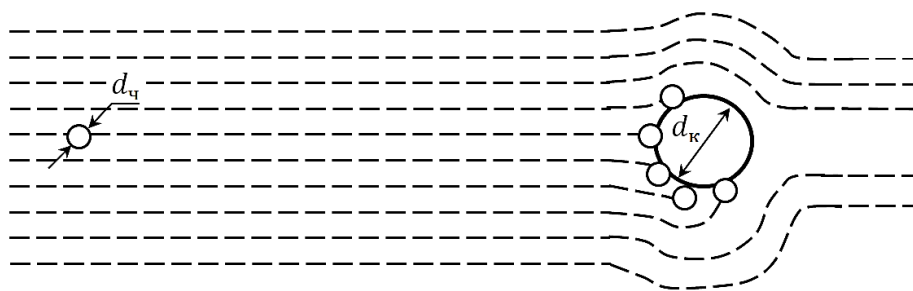


Рис. 2. Линии тока воздуха и траектории частиц дыма при обтекании капли воды

Четвертая стадия определяет гравитационное осаждение образовавшихся конгломератов «частицы-капля» [11, 12].

Все эти процессы комплексно учитывает суммарный коэффициент захвата частицы дыма сферической каплей жидкости, который может быть определен как отношение количества частиц, соударяющихся с каплей жидкости, к количеству частиц, которые соударялись бы, если линии тока не отклонялись каплей.

Суммарный коэффициент эффективности осаждения на одиночной капле η_{Σ} рассчитывают по формуле

$$\eta_{\Sigma} = 1 - (1 - \eta_{и.с})(1 - \eta_{зах})(1 - \eta_{диф}), \quad (10)$$

где $\eta_{и.с}$, $\eta_{зах}$, $\eta_{диф}$ – эффективность дымоосаждения от инерционного столкновения, захвата (зацепления) и диффузии соответственно.

Эффективность дымоосаждения от инерционного столкновения (соударения) зависит от числа Стокса:

$$Stk = \frac{C\rho_{ч}v_{к}d_{ч}^2}{18\mu_{к}}, \quad (11)$$

где $\mu = 181,9 \cdot 10^{-7}$ Па·с – динамическая вязкость воздуха;

C – эмпирический коэффициент; при $d_{ч} \geq 1$ мкм $C \approx 1$.

При возрастании числа Стокса для расчета коэффициента инерционного столкновения Ленгмюром предложены следующие зависимости:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta_{и.с} = 0, \text{ если } Stk < 0,083; \\ \eta_{и.с} = \frac{Stk^2}{(Stk+0,35)^2}, \text{ если } Stk > 0,2; \\ \eta_{и.с} = [1 + 0,75 \ln \frac{2Stk}{Stk-1,214}]^{-2}, \text{ если } Stk > 1,214. \end{array} \right. \quad (12)$$

Эффективность захвата (зацепления) частиц одиночной сферической каплей:

• при потенциальном обтекании и пренебрежении инерционными эффектами

$$\eta_{\text{зах}} = (1 + R^2) - \frac{1}{1+R} \approx 3R, \quad (13)$$

• при большой инерционности

$$\eta_{\text{зах}} = (1 + R)^2 - \frac{1}{1+R} \approx 2R, \quad (14)$$

где $R = d_{\text{ч}}/d_{\text{к}}$.

В целом при $d_{\text{ч}} \ll d_{\text{к}}$

$$\eta_{\text{зах}} \approx 2,5R. \quad (15)$$

В соответствии с моделью Ленгмюра эффективность диффузионного осаждения

$$\eta_{\text{диф}} = \frac{8}{3\pi} \sqrt{\frac{2}{\text{Pe}}}, \quad (16)$$

где Pe – диффузионный критерий Пекле.

В условиях дымоосаждения при пожаре для дымовых частиц $d_{\text{ч}} = 0,1 \dots 10$ мкм и капель воды $d_{\text{к}} = 50 \dots 500$ мкм механизмами зацепления и диффузии можно пренебречь и рассчитывать η_{Σ} по формулам (12).

Учитывая, что горизонтальная скорость дымовых частиц $v_{\text{ч}}$, м/с, не превышает $0,5 \dots 0,7$ м/с, то есть $v_{\text{ч}} \ll v_{\text{к}}$, а также значительную скорость процесса осаждения, в первом приближении можно пренебречь проникновением вновь генерируемых очагом пожара частиц в зону орошения, то есть принять $\dot{M} = 0$. Полагаем также, что в этих условиях генерирование и дымоудаление взаимно компенсируют друг друга. В этом случае выражение (8) упрощается:

$$n_{\text{ч}} = n_{\text{ч}0} e^{-b\tau}; \quad (17)$$

$$\frac{V_{\text{с}}}{V_{\text{с}0}} = [\exp(-b\tau)]^{-1,036}; \quad (18)$$

$$\tau = -\frac{1}{1,036b} \ln \frac{V_{\text{с}}}{V_{\text{с}0}}. \quad (19)$$

Рассчитаем отношение $V_{\text{с}}/V_{\text{с}0}$ (улучшение видимости) в зависимости от времени при следующих исходных данных:

$d_{\text{к}} = 300$ мкм; $v_{\text{к}} = 5$ м/с; $w = V = 70$ м³; $d_{\text{ч}} = 5$ мкм; $\rho_{\text{ч}} = 1350$ кг/м³; $\rho_{\text{ж}} = 1000$ кг/м³; $G_{\text{ж}} = 1,3 \dots 5,2$ л/с.

По формуле (4) рассчитываем число Стокса: $Stk = 1,717$, а по (5) – коэффициент η_{Σ} : $\eta_{\Sigma} = 0,167$.

Задаем начальную видимость в помещении $V_{s0}=1$ м. Результаты расчетов и сравнение их с экспериментальными данными представлены на рис. 3.

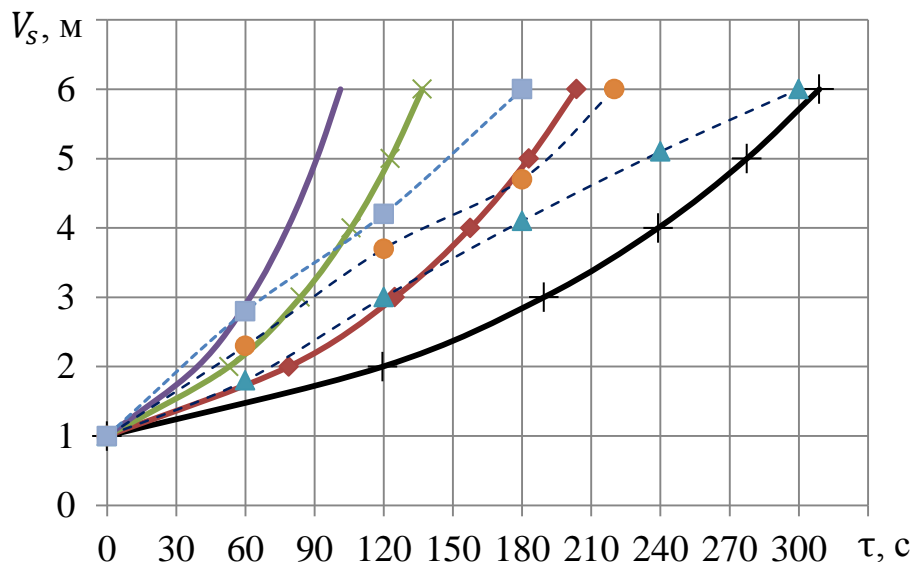


Рис. 3. Результаты расчета необходимого времени подачи воздушно-водяной смеси в задымленное помещение в зависимости от количества используемых форсунок, и сравнение их с экспериментальными данными:

расчетные данные: —+— — одна форсунка; —◆— — две форсунки; —×— — три форсунки; — — — — четыре форсунки;
 экспериментальные данные [10]: - - ▲ - - — одна форсунка; - - ● - - — две форсунки; - - ■ - - — три форсунки

Таким образом, для улучшения видимости до 6 м (приемлемое условие для работы спасателей) в помещении объемом 70 м^3 необходимо подавать в него распыленную воду в количестве:

- 1,3 л/с – в течение 5 мин (одна форсунка);
- 2,6 л/с – в течение 3,5 мин (две форсунки);
- 3,9 л/с – в течение 2,1 мин (три форсунки);
- 5,2 л/с – в течение 1,6 мин (четыре форсунки).

Адекватность полученных результатов подтверждают данные экспериментов, проведенных другими исследователями, и, в частности, в тепловой камере на полигоне НИИГД «Респиратор» [6, 8, 9].

Выводы

1. Разработана конструкция интегрированного устройства дымоподавления на базе переносного пожарного дымососа.
2. Определены необходимые расходы воды для улучшения видимости в задымленном помещении.
3. Рассчитано необходимое время подачи распыленной воды в аварийное задымленное помещение.

Список литературы / References

1. Grimwood, P. Tactical ventilation [Electronic resource]. Available at: <http://www.firetactics.com/Tactical-Ventilation.pdf> (assessed 17.02.2017).

2. Gojkovic, D. Initial backdraft experiments // Report 3121, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden, 2001, 89 p.

3. Луц, В.І. Тактико-технічні характеристики насадки-розприскувача для дрібнодисперсного розпорошення води з метою осадження продуктів горіння / В.І. Луц, П.І. Мельник // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2012. – № 21. – С. 111 – 115.

Lushch, V.I., Mel'nyk, P.I. *Taktyko-tekhnichni kharakterystyky nasadky-rozpryskuvacha dlia dribnodispersnogo rozporoshennia vody z metoiu osadzhennia produktiv gorinnia* [Performance characteristics of the nozzle of the sprayer for fine-dispersed water atomization on purpose of precipitation of the combustion products]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk.prats'* [Fire safety: proc. of scientific papers]. L'viv, LDU BZhd Publ., 2012, no. 21, pp. 111 – 115.

4. Баланюк, В.М. Нові підходи подачі тонкорозпиленої води з поверхнево-активними речовинами та сумішами хімічних сполук / В.М. Баланюк, В.І. Луц, М.А. Наливайко // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2012. – № 20. – С. 118 – 123.

Balaniuk, V.M., Lushch, V.I., Nalyvayko, M.A. *Novi pidkhody podachi tonkorozpylenoi vody z poverkhnevo-aktyvnymy rehovynamy ta sumishamy khimichnykh spoluk* [New approaches of the supply of the fine-dispersed water with surface-active substances and mixtures of chemical compounds]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk.prats'* [Fire safety: proc. of scientific papers]. L'viv, LDU BZhd Publ., 2012, no. 20, pp. 118 – 123.

5. Луц, В.І. Підвищення ефективності застосування переносних пожежних димовсмоктувачів / В.І. Луц, О.В. Лазаренко, Н.О. Штангрет // Пожежна безпека: зб. наук. праць. – Львів: ЛДУ БЖД, 2016. – № 28. – С. 88 – 94.

Lushch, V.I., Lazarenko, O.V., Shtangret, N.O. *Pidvyshchennia efektyvnosti zastosuvannia perenosnykh pozhezhnykh dymovsmoktuvachiv* [Higher efficiency of the use of portable fire smoke exhausters]. *Pozhezhna bezpeka: zb. nauk.prats'* [Fire safety: proc. of scientific papers]. L'viv, LDU BZhd Publ., 2016, no. 28, pp. 88 – 94.

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

Shmulevtsov, I.A. *Vybor optimal'nykh rezhimov raboty ustroystva po dostavke raspylenoy vody v ochag pozhara* [Choice of best performances of operation of a device for delivery of water sprayed to a seat of fire]. *Chrezvychnyye situatsii: obrazovaniye i nauka. Mezhdunarodnyy nauchno-prakticheskiy zhurnal – Emergency situations: education and science. International theoretical and practical journal.* Homyel', GII MChS Respubliki Belarus' Publ., 2012, vol. 7, no. 1, pp. 34 – 38.

7. Богомаз, А.М. Снижение задымленности в помещении при подаче воздушно-водяной смеси / А.М. Богомаз, И.Ф. Дикенштейн // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 4(53). – С. 15 – 23.

Bogomaz, A.M., Dikensteyn, I.F. *Snizheniye zadymlennosti v pomeshchenii pri podache vozdushno-vodyanoy smesi* [Reduction of smoke content in a premise by supply of the air-water mixture]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 4 (53), pp. 15 – 23.

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

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

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

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

10. Кулев, Д.Х. Обзорная информация. Опасность продуктов горения полимерных материалов. Серия «Пожарная безопасность». – Вып. 8/83 / Д.Х. Кулев. – М.: ВНИИПО, 1983.– 22 с.

Kulev, D.Kh. *Obzornaya informatsiya. Opasnost' produktov goreniya polimernykh materialov. Seriya "Pozharnaya bezopasnost'"* [Summarizing information. Danger of products of combustion of polymeric materials. Series "Fire safety"]. Moscow, VNIIPPO Publ., 1983, issue 8/83, 22 p.

11. Исследование процесса осаждения частиц пыли на каплях воды в центробежном скруббере / Б.С. Сажин, М.П. Тюрин, Л.М. Кочетов, И.А. Попов,

В.Б. Сажин, М.А. Апарушкина, О.В. Платонова // Успехи в химии и химической технологии. – 2009. – Т. XXIII, № 2 (95). – С.117 – 123.

Sazhin, V.B., Tyurin, M.P., Kochetov, L.M., Popov, I.A., Sazhin, V.B., Aparushkina, M.A., Platonova, O.V. *Issledovaniye protsessa osazhdeniya chastits pyli na kaplyakh vody v tsentrobezhnom skrubbere* [Investigation of the process of sedimentation of dust particles on water drops in the centrifugal scrubber]. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii – Successes in chemistry and chemical engineering*, 2009, vol. XXIII, no. 2 (95), pp. 117 – 123.

12. Юрченко, А.А. Исследование коэффициента захвата аэрозольных частиц каплями воды при орошении / А.А. Юрченко // Зб. наук. праць НГУ. – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2013. – № 39. – С. 187 – 194.

Yurchenko, A.A. *Issledovaniye koeffitsienta zakhvata aerazolnykh chastits kaplyami vody pri oroshenii* [Investigation of the trapping coefficient of aerosol particles with water drops by spraying]. *Zb. nauk. prats' NGU* [Collected scientific papers of the NGU]. Dnipropetrovs'k, RVK NGU Publ., 2013, no. 39, pp. 187 – 194.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 20.02.2017

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

Andrey Yuryevich Kolyada, head of department; e-mail: kolyada1980@mail.ru;

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

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

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

PARAMETERS OF A DEVICE FOR SMOKE PRECIPITATION IN EMERGENCY PREMISES

Purpose. Determination of parameters of an installation of smoke suppression with water fine-dispersed.

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

Results. The dependences are obtained to determine intensity and time of the feed of water fine-dispersed into the emergency premise with the aim of higher visibility.

Scientific novelty. The dependence of range of visibility in the emergency premise on intensity of feed of the air-water mixture, drop size of water dispersed, total factor of capture of the smoke particles with the drops and size of the premise is ascertained.

Practical value. The introduction of the installation worked out in the fire-rescue subdivisions of the Ministry of Emergency Situations will allow heightening the efficiency of their activities, will reduce the danger to life of the humans being saved and that one of the fighting fire men.

Keywords: *smoke particles; smoke precipitation; smoke exhauster; concentration of particles; visibility; water consumption; total factor of capture.*

УДК [622.69:552.574]:614.841.22

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

Евгений Александрович Головченко, замнач. отд.; e-mail: ennio_80@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-13-52; 311-40-37*

САМОВОЗГОРАНИЕ УГЛЯ В МЕСТАХ СКЛАДИРОВАНИЯ НА ПОВЕРХНОСТИ

Цель. Опробование нового метода расчета инкубационного периода самовозгорания угля на примере реального пожара.

Методика. Экспериментальные исследования физико-химических свойств угля, процесса его окисления и установление инкубационного периода самовозгорания угля с использованием нового метода расчета.

Результаты. Установлены кинетические параметры окисления угля. Для определения причин самовозгорания угля при его складировании на поверхности предложено использовать математическую модель гетерогенного окисления угля с учетом испарения влаги. Показано, что существенное влияние на возникновение очага самовозгорания угля оказывают размеры скопления и условия окружающей среды. Установлена зависимость инкубационного периода самовозгорания угля, хранящегося на поверхности, от радиуса его скопления.

Научная новизна. Определены константы скорости окисления угля, в том числе и критическая температура его самовозгорания.

Практическая значимость. Полученные зависимости рекомендуются для опытно-промышленного использования определения причины возникновения пожара от самовозгорания угля.

Выводы. Установлены причины возникновения пожара при хранении скопления угля на поверхности. На основании данных лабораторного анализа найдены кинетические параметры окисления и установлен инкубационный период самовозгорания для конкретного скопления твердого топлива.

Ключевые слова: самовозгорание; критическая температура; критическая толщина скопления; инкубационный период; уголь.

Проблема и ее связь с важными научными и практическими задачами. Условия протекания экзотермической реакции имеют важнейшее значение при выявлении критических параметров самовозгорания угля в процессе его самонагревания. Они определяются не только свойствами самого угля, но и его геометрическими параметрами, а также физическими условиями на границе объема с окружающей средой. Например, изменение объема угля или его геометрической формы повлечет нарушение условий массо- и теплопереноса внутри твердого топлива и вне его и приведет к изменению температуры самовозгорания [1]. По отношению к реагирующей системе физические факторы, влияющие на протекание гетерогенной реакции окисления в скоплении угля, можно разделить на внутренние и внешние. К внутренним относят физико-химические характеристики угля: кажущуюся плотность, пористость, влажность, дробимость, способность к адсорбции

кислорода, теплопроводность и др. К внешним относят факторы, определяющие условия на границе объема системы с окружающей средой – температуру, давление, скорость воздуха, геометрическую форму объема скопления, а также тепло- и массообмен на границе.

Существенную роль в процессе самонагревания слоя материала играет его геометрическая форма и размеры внешней поверхности. От размера этой поверхности при данных объеме и форме зависит интенсивность теплообмена с окружающей средой. Известно, что скорость тепловыделения зависит от кинетических параметров протекания реакции, а скорость теплоотвода – от размера поверхности теплообмена и разности температур скопления угля и окружающей среды [2, 3].

В зависимости от условий теплообмена самовозгорание каждого скопления при данном значении ее удельной поверхности произойдет при определенной температуре окружающей среды.

Длительное хранение угля в естественных условиях окружающей среды сопровождается процессом выветривания, в результате которого происходит изменение физико-химических свойств угля. Различают механическое выветривание, когда в результате колебаний температуры и механической деятельности воды и ветра происходит изменение физических свойств углей (разрушение его кусков, увеличение в них количества трещин, уменьшение механической прочности) и химическое выветривание, когда происходит изменение химических и физических свойств угля под влиянием, главным образом, действия кислорода. Поэтому химическое выветривание называют также окислительным выветриванием.

Зоны выветривания являются благоприятной средой для дальнейшего развития процесса окисления под действием кислорода, и особенно кислорода, растворенного в адсорбционных пленках воды на поверхности угля. Интенсивность гидролитических процессов усиливается с увеличением стадии окисления угля благодаря тому, что в угле в это время накапливаются кислородсодержащие группы, активизирующие данный процесс.

Свойства углей при длительном окислении значительно изменяются: уменьшается концентрация в них горючих компонентов – углерода и водорода и увеличивается концентрация кислорода, снижается теплота сгорания, что существенно уменьшает ценность угля как энергетического топлива, ухудшается спекаемость углей и уменьшается выход химических продуктов коксования.

Анализ последних исследований. В работах [4, 5] использована математическая модель самонагревания угля за счет химических реакций окисления его кислородом для расчета времени, необходимого для достижения углем критической температуры. Однако не учитывается испарение влаги, влияющее на инкубационный период самонагревания угля.

Возможность определения минимальной толщины скопления угля, подверженного самовозгоранию, рассмотрена в работе [5], но представляют интерес дальнейшие исследования в этом направлении.

Цель настоящей работы – исследовать возможность возникновения пожара в результате самовозгорания угля на основе ранее предложенной модели низкотемпературного окисления твердого топлива, полученного ее решения и экспериментальных данных о физико-химических свойствах угля.

Материалы и результаты исследований. Возникающее в скоплении самонагревание угля первоначально бывает общим, т.е. по всему объему, исключая поверхностный слой толщиной от 30 до 50 см, но по мере повышения температуры оно приобретает гнездовой характер. Рост температуры в очаге самовозгорания до критической происходит очень медленно и может быть приостановлен интенсивным проветриванием скопления.

Несмотря на то, что при низких температурах окисление углей идет медленно и теплоты выделяется мало, в больших скоплениях угля, где теплоотдача в окружающую среду затруднена, самовозгорание все же происходит.

Неблагоприятные климатические условия: обильные атмосферные осадки, частая, резкая смена температур, сильные ветры – также способствуют усилению газообмена, что приводит к еще большей интенсификации окислительных процессов, ускорению самонагревания угля.

По сообщениям органов пожарного надзора, в разных странах все чаще регистрируют случаи возгорания угля, хранящегося в частном секторе. Например, с начала 2008 г. по Карагандинской области (Республика Казахстан) зарегистрировано более 40 пожаров, связанных с самовозгоранием угля в местах его складирования. Исключением не стала и Донецкая область, где по адресу: г. Макеевка, ул. Глазунова, 28 произошло возгорание угля в сарае частного дома, при расследовании выяснили, что одной из причин стало самовозгорание данного угля.

Уголь с места пожара был доставлен в НИИГД «Респиратор» для исследования причин возгорания. В результате лабораторных исследований физико-химических свойств угля были определены плотность, дробимость, влажность, константы скорости окисления при различных температурах, что позволило установить критическую температуру самовозгорания $T_{кр} = 365$ К.

Представляет интерес рассмотрение возможности самовозгорания угля путем расчета времени, необходимого для достижения углем критической температуры. Используем решение задачи самонагревания угля за счет химических реакций окисления его кислородом с учетом испарения влаги, приведенное в работе [4] и имеющее вид

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

где $t_{\text{инк}}$ – время достижения углем критической температуры, с;
 T_0 и $T_{\text{кр}}$ – начальная и критическая температуры угля, К;
 b – скорость нагревания угля, определяемая зависимостью

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

Bi – критерий теплообмена Био, равный

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

α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К), который находим по формуле

$$\alpha = \frac{0,42\lambda_{\text{пр}}}{R_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

$\lambda_{\text{пр}}$ – приведенный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К), определяемый зависимостью

$$\lambda_{\text{пр}} = \varepsilon\lambda_{\text{в}} + (1 - \varepsilon)\lambda_{\text{у}}; \quad (5)$$

ε – коэффициент порозности (скважистости) скопления угля, рассчитываемый по формуле

$$\varepsilon = \frac{0,48}{1 + D_p/75}; \quad (6)$$

D_p – дробимость угля;

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

$$\lambda_{\text{в}} = 6,98 \cdot 10^{-3} + 6,41 \cdot 10^{-5}T_0; \quad (7)$$

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

Γ_T – комплексный критерий генерации теплоты скоплением угля радиусом $R_{\text{ср}}$;

$$\Gamma_T = \frac{1}{B} \frac{R_{\text{ср}}^2}{a}; \quad (8)$$

$R_{\text{ср}}$ – радиус скопления угля, м;

a – коэффициент температуропроводности угля, м²/с;

ξ – доля реакционной поверхности угля, вступающей в реакции окисления;

C_{O_2} – концентрация кислорода, моль/м³;

q_1 – теплота реакции окисления, Дж/моль;

$k_{\text{кр}}$ – константа скорости окисления при критической температуре, с⁻¹;

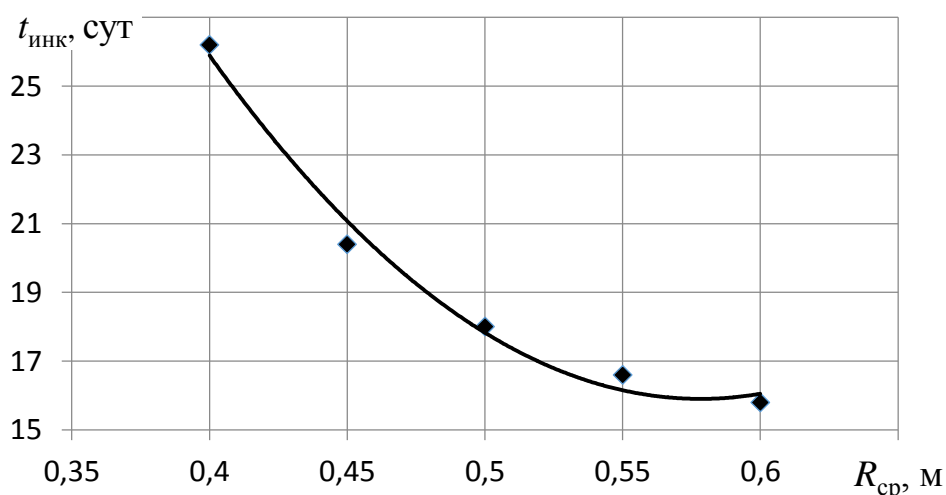
- ρ – плотность угля, кг/м³;
 c_v – удельная теплоемкость при постоянном объеме, Дж/(кг·К);
 k_v – константа скорости испарения влаги, с⁻¹;
 q_v – теплота испарения влаги, Дж/моль;
 W – концентрация влаги в угле, моль/м³.

С учетом среднесуточной температуры летних месяцев, равной 301 К, инкубационный период $t_{\text{инк}}$ достигает 21 сут при низкой влажности атмосферного воздуха и отсутствии перепадов дневных и ночных температур, что препятствует возникновению самовозгорания. Понижение среднесуточной температуры в сентябре до 292 К увеличивает инкубационный период самовозгорания до 36 сут, однако резкие колебания температур и увеличение влажности окружающего воздуха способствуют возникновению очага самовозгорания.

Исследования [2, 5] слоевых скоплений угля, образующихся при обрушении угольных пачек и пропластков, показывают влияние значения критического радиуса скопления на процесс самовозгорания. Поэтому, используя предложенную схему расчета, рассмотрим возможность самовозгорания угля, хранящегося на поверхности, при различном радиусе скопления.

Аппроксимация рассчитанных значений инкубационного периода $t_{\text{инк}}$ при различных радиусах скопления с коэффициентом корреляции 0,99 (см. рисунок) устанавливает эмпирическую зависимость вида

$$t_{\text{инк}} = 314,2(R_{\text{ср}})^2 - 363,4R_{\text{ср}} + 121.$$



Зависимость инкубационного периода $t_{\text{инк}}$ самовозгорания угля от радиуса его скопления $R_{\text{ср}}$

Анализ рисунка показывает, что для скопления угля с исследуемыми физико-химическими свойствами уменьшение радиуса скопления от 0,5 до 0,4 м

увеличивает продолжительность инкубационного периода самовозгорания на 8 сут, в то время как изменение R_{cp} в диапазоне 0,5...0,6 м приводит к уменьшению $t_{инк}$ на 2 сут.

Выводы. Исследованы особенности самовозгорания скопления угля, который складировать на поверхности, с использованием модели самонагревания угля за счет химических реакций окисления его кислородом. Аналитические исследования показали влияние размера скопления угля на возможность его самовозгорания в результате окислительных процессов.

Список литературы / References

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

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

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

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

3. 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.

4. Греков, С.П. Минимальное безопасное скопление органического материала / С.П. Греков, И.Г. Старикова, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 1 (53). – С. 23 – 30.

Grekov, S.P., Starikova, I.G., Orlikova, V.P. *Minimal'noye bezopasnoye skopleniye organicheskogo materiala* [The minimum safe accumulation of an organic material]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 23 – 30.

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

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

Viktoria Petrovna Orlikova, scientific associate; e-mail: orlikova.69@yandex.ua;
Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, deputy head of department; e-mail: ennio_80@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work, Fire Safety and Civil Protection
of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 311-13-52; 311-40-37

SPONTANEOUS COMBUSTION OF COAL IN STORING PLACES ON THE SURFACE

Purpose. Testing the new calculation method of ascertainment of the incubation period of the spontaneous combustion of coal by way of example of a real fire.

Methods. Experimental investigations of physicochemical properties of coal, of the process of its oxidation and ascertainment of the incubation period of the spontaneous combustion of coal with the use of the new calculation method.

Results. The kinetic parameters of oxidation of coal are established. To ascertain the causes of the spontaneous combustion of coal by its storing on the surface it is proposed to use the mathematical model of the heterogeneous oxidation of coal taking into account the moisture evaporation. It is shown that the sizes of an accumulation and environmental conditions influence considerably on the origin of a place of the spontaneous ignition of coal. The dependence of the incubation period of the spontaneous combustion of coal being stored on the surface on the radius of its accumulation is ascertained.

Scientific novelty. The constants of the oxidation rate of coal including the critical temperature of its self-ignition are established.

Practical value. The dependences received are recommended for the experimental-industrial use to determine the cause of origin of the fire because of the spontaneous combustion of coal.

Conclusions. The causes of origin of the fire by the storing of the coal accumulation on the surface are established. On the basis of the data of the laboratory analysis the kinetic parameters of the oxidation are found, and the incubation period of the spontaneous combustion is established for the concrete accumulation of the solid fuel.

Keywords: *spontaneous ignition; critical temperature; critical thickness of the accumulation; incubation period; coal.*

УДК 621.841.245:621.313.012.5

Владелен Валерьевич Гуржий, ст. науч. сотр.; e-mail: opbush@mail.ru;

Евгений Олегович Зинченко, инж.; e-mail: evgeniy.zintchenko@yandex.ru

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

ХАРАКТЕР ОПЛАВЛЕНИЯ ПРОВОДНИКОВ ПРИ КОРОТКОМ ЗАМЫКАНИИ

Цель. Установление аварийного режима работы по характеру оплавлений образцов, изъятых с места пожара.

Методы. Инструментальные исследования металлических проводников со следами оплавлений.

Результаты. Определение причины оплавления (разрушения) проводников, изъятых с места пожара.

Научная новизна. Представлены характерные признаки аварийного режима работы – короткое замыкание в медных и алюминиевых проводниках.

Практическая значимость. Результаты инструментальных исследований позволяют определить отношение аварийных режимов работы к возникновению пожара.

Ключевые слова: *аварийные режимы работы; короткое замыкание; перегрузка; большое переходное сопротивление; инструментальные исследования.*

Постановка проблемы. По статистическим данным [1], пожары в электроустановках в целом составляют 26 %, на предприятиях доля пожаров в электроустановках достигает 38 %, в многоэтажных жилых домах 32 %, а в частных жилых домах – до 70 %.

При составлении заключения о причине пожара устанавливают причинно-следственную связь между возможными аварийными режимами работы электроустановок и возникновением пожара, при этом решают основные вопросы [2]:

1. Имеются ли на фрагментах образцов, изъятых с места пожара, следы, которые указывают на аварийный режим работы в электросети?

2. При наличии короткого замыкания (далее – КЗ) определить момент его возникновения (вследствие аварийного режима работы или внешнего воздействия высокой температуры).

Результаты изучения материалов по пожарам, собранных в ходе дознания, а также заключений специалистов по ним указывают на то, что вывод о причине пожара, когда на месте происшествия обнаруживают фрагменты образцов со следами оплавлений (разрушений) в основном делают без проведения современных инструментальных исследований. В то же время следы оплавлений могут образовываться не только вследствие аварийных режимов работы электроустановок, но и от внешнего воздействия высокой температуры при пожаре. Кроме того, характерные следы оплавлений

возникают на проводах (кабелях) и электроустановках от КЗ, ставшего следствием пожара. Поэтому выводы о причине пожара зачастую не имеют убедительной доказательной основы.

Происходит это из-за того, что специалисты, проводящие первоначальные следственные действия на месте пожара, даже имея вещественные доказательства – части электроустановок (аппараты защиты, коммутационные аппараты, фрагменты проводников, светотехнические изделия и т.п.), – не могут провести исследования из-за отсутствия современного инструментального оборудования и методик определения следов аварийных режимов.

Анализ последних исследований. Причинно-следственная связь между аварийными режимами работы электроустановки и возникновением пожара выявляется только на основании комплексного инструментального исследования вещественных доказательств, изъятых с места пожара. Аналогичные исследования ранее не проводили. Поэтому с 2015 г. НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР проводит исследования изменения свойств материалов вследствие внутреннего или внешнего теплового воздействия согласно разработанным методическим рекомендациям по определению вида короткого замыкания, в которых рассмотрены этапы комплексного инструментального исследования и методы их проведения.

Результаты исследований. С физической точки зрения можно выделить три основных пожароопасных процесса, характерных для аварийных режимов работы электроустановок: перегрузка по току, КЗ, большое переходное сопротивление. Указанные процессы имеют высокую пожарную опасность и сопровождаются тепловыми эффектами, которые при определенных условиях могут стать причинами возгорания или вызвать новые повреждения в элементах электросети. Аварийные режимы, происходящие в электросети, формируют на ее элементах закономерную совокупность признаков (перегорания, оплавления токоведущих элементов и т.п.).

КЗ по моменту его возникновения разделяют на [3, 4]:

- первичное, которое происходит в отсутствие воздействия на проводник опасных факторов пожара;
- вторичное как результат развития пожара при повышении температуры до значения, достаточного для начала термического разложения горючих материалов.

КЗ сопровождается образованием электрической дуги с температурой 2000...4000 °С и разлётом (на расстояние до нескольких метров) расплавленных до температуры 2200...2300 °С частиц материалов токоведущих элементов, что приводит к возгоранию на аварийных участках.

Принципами инструментальных исследований по установлению причастности аварийных режимов электроустановок к возникновению пожара являются: использование существующих апробированных методик и современных технических средств, прозрачность, обоснованность и убедительность выводов.

Основным этапом инструментального исследования фрагментов электроустановок является визуальный осмотр, при котором устанавливается предварительная причина следов оплавления (разрушения).

На этом этапе используются материалы протокола осмотра места пожара и данные о месторасположении проводника с оплавлениями по отношению к вероятному очагу пожара.

Для определения причины оплавления проводников при визуальном осмотре (пожар или КЗ) исследуют:

- характер и вид оплавлений;
- изменение площади поперечного сечения;
- состояние изоляции.

Исследованиями [2] установлено, что поверхности проводников, которые подвергались воздействию высокой температуры при пожаре, имеют следующие характерные признаки (рис. 1):

- спекание проволок в жиле проводника;
- значительное изменение геометрических размеров и произвольность формы оплавлений;
- повышенная хрупкость при изгибе;
- частичное или полное отсутствие изоляционного материала проводника;
- протяженность зон оплавлений.



Рис. 1. Оплавления фрагментов проводников, образованные в результате внешнего воздействия высокой температуры при пожаре

Исследования состояния изоляции показали, что при термическом воздействии изоляционный материал проводников высыхает, трескается, тускнеет, меняет цвет и приобретает значительную хрупкость (осыпается при небольшом нажатии).

Возникающая при КЗ электрическая дуга вызывает локальные оплавления поверхности проводников. Места оплавлений характеризуются шарообразной, овальной, каплеобразной формами, имеют вид косого среза или

кратера, при этом существует четкая граница между зоной поверхности оплавления и прилегающей к ней части проводника. Сечение проводника изменяется вблизи места оплавления на небольшом участке.

При дифференциации момента возникновения КЗ (первичное или вторичное) исследуют поверхности оплавлений:

- изменение формы и структуры поверхности;
- наличие и характер микрооплавлений;
- протяженность зон областей разрушения.

Первичное КЗ характеризуется локальным каплеобразным оплавлением и гладкой поверхностью, при этом в месте оплавления изменяется геометрическая форма проводников (рис. 2, 3). Наблюдается обугленность их изоляции только на внутренней поверхности.



Рис. 2. Фрагмент оплавления проводника при первичном КЗ (увеличение в 20 раз):

a – алюминиевый проводник; *б* – медный проводник



Рис. 3. Виды оплавлений проводников при первичном КЗ

Вывод о наличии вторичного КЗ можно сделать с достоверной точностью при инструментальном исследовании структурной поверхности оплавления проводника при помощи микроскопа Levenhuk DTS 500 LCD с программным обеспечением Portable Capture Pro (увеличение не менее чем в 50...200 раз) на наличие газовых раковин и пор, которые образовались в среде, насыщенной газообразными продуктами разложения горючих материалов при пониженной концентрации кислорода.

Вторичное КЗ характеризуется небольшими шарообразными наплывами металла по длине проводника, газовыми раковинами и порами на поверхности оплавления (рис. 4). Наблюдается обугленность внутренней и внешней поверхностей изоляции проводника.

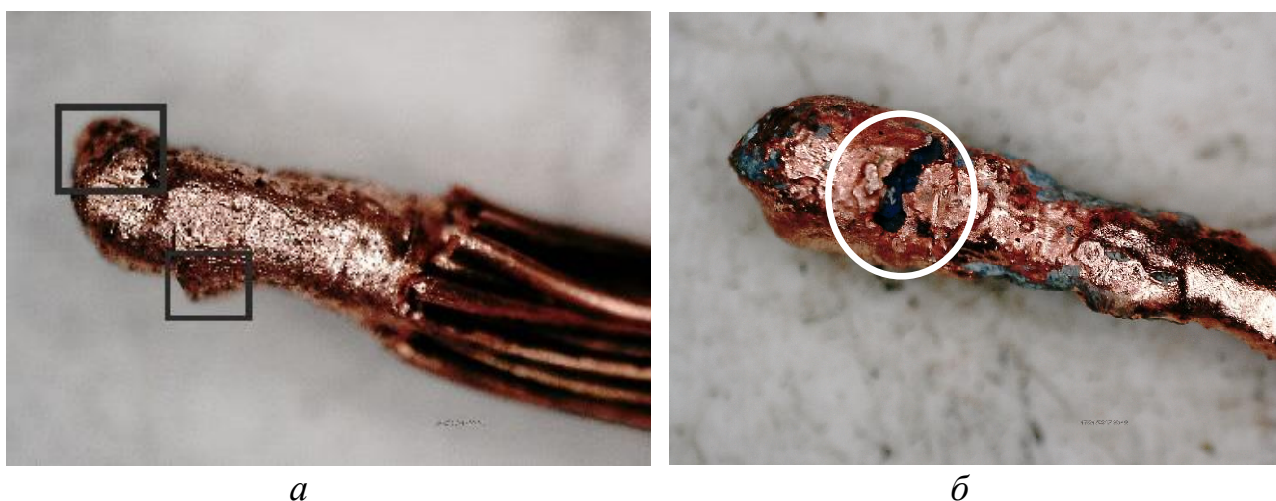


Рис. 4. Оплавления медных проводников, образовавшиеся при вторичном КЗ (увеличение в 100 раз):

- а* – рельефная структура поверхности оплавления;
б – газовые поры на поверхности оплавления

Исследования по определению отношения аварийных режимов работы электроустановок к возникновению пожара проводят совместно специалисты испытательной пожарной лаборатории Республиканского спасательного центра МЧС ДНР и НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР. Для этих целей НИИГД «Респиратор» МЧС ДНР разработаны методические рекомендации, в которых приведены этапы комплексного инструментального исследования и методы их проведения.

Выводы

1. Исследованиями установлено, что при визуальном осмотре следов оплавлений (разрушений) фрагментов проводников, изъятых с места пожара, можно предварительно определить отношение аварийных режимов работы электроустановок к возникновению пожара, а также установить момент возникновения этих режимов.

2. Представлены характерные оплавления проводников при первичном и вторичном КЗ.

3. Результаты инструментальных исследований используют для достоверности установления возможных причин пожаров.

Список литературы / References

1. Статистика пожаров // Пожарная безопасность. – 2007. – № 2. – С. 95 – 99.

Statistika pozharov [Statistics of fires]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2007, no. 2, pp. 95 – 99.

2. Мокряк, А.Ю. Актуальность проблемы экспертного анализа оплавлений медных проводников после пожара / А.Ю. Мокряк, С.О. Шульгин, Н.Н. Романов // Природные и техногенные риски. – 2013. – № 2. – С. 41 – 46.

Mokryak, A.Yu., Shul'gin, S.O., Romanov, N.N. *Aktual'nost' problemy ekspertnogo analiza oplavleniy mednykh provodnikov posle pozhara* [Actuality of the problem of the expert analysis of the washings of copper conductors after the fire]. *Prirodnyye i tekhnogennyye riski – Natural and anthropogenic risks*, 2013, no. 2, pp. 41 – 46.

3. Чешко, И.Д. Экспертиза пожаров (объекты, методы, методики исследования) / под ред. канд. юр. наук Н.А. Андреева. – СПб.: СПБИПБ МВД России, 1997. – 560 с.

Cheshko, I.D. *Ekspertiza pozharov (ob'yekty, metody, metodiki issledovaniya)* [Expert examination of fires (objects, methods, methods of investigation)]. *Pod red. kand. yur. nauk N.A. Andreyeva* [Cand. of Law N.A. Andreyev, ed.]. St. Petersburg, SPbIPB MVD Rossii Publ., 1997, 560 p.

4. Исследование причин возгорания автотранспортных средств / А.И. Богатищев, А.В. Довбня, С.И. Зернов и др. – М.: ГУ ЭКЦ МВД России, 2003. – 82 с.

Bogatishchev, A.I., Dovbnya, A.V., Zernov, S.I. etc. *Issledovaniye prichin vozgoraniya avtotransportnykh sredstv* [Investigation of causes of ignition of vehicles]. Moscow, GU EKTs MVD Rossii Publ., 2003, 82 p.

Vladelen Valeryevich Gurzhiy, senior scientific associate; e-mail: opbush@mail.ru;

Yevgeny Olegovich Zinchenko, engineer; e-mail: evgeniy.zintchenko@yandex.ru

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

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

CHARACTER OF THE WASHING OF CONDUCTORS BY THE SHORT CIRCUIT

Purpose. Establishment of the emergency mode of operation by character of the washings of the specimens withdrawn from the fire-place.

Methods. Tool investigations of the metallic conductors stained with the washings.

Results. Determination of the cause of the washing (destruction) of the conductors withdrawn from the fire-place.

Scientific novelty. The characteristic signs of the emergency mode of operation, i.e. the short circuit in the copper and aluminium conductors, are presented.

Practical value. The results of the tool investigations allow determining the relation of the emergency modes of operation to the origin of the fire.

Keywords: *emergency modes of operation; short circuit; overload; large transient resistance; tool investigations.*

УДК [614.845.2:62-182.4]:630*43

*Денис Александрович Тимошенко, начальник; e-mail: denistimoshenko8293@gmail.com
59-я пожарно-спасательная часть Государственного пожарно-спасательного отряда МЧС ДНР
287100, пгт Тельманово, ул. Ленина, 171. Тел. +38 095-001-03-39; 071-311-73-74*

РАНЦЕВЫЕ ОГНЕТУШИТЕЛИ ДЛЯ ЛИКВИДАЦИИ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

Цель. Определить основные направления разработки ранцевых огнетушителей для ликвидации лесных пожаров.

Методика. Анализ и обобщение материалов по существующим ранцевым лесным огнетушителям для ликвидации лесных пожаров.

Результаты. Выделены основные направления разработки ранцевых огнетушителей для ликвидации лесных пожаров, обоснованы параметры функционирования ранцевых лесных огнетушителей.

Научная новизна. Раскрыты особенности функционирования ранцевых лесных огнетушителей, приводимых в действие мускульной силой человека в условиях пожара.

Практическая значимость. Обусловлены основные требования к разработкам ранцевых огнетушителей для ликвидации лесных пожаров.

Ключевые слова: *ранцевый лесной огнетушитель; расход воды; линейная интенсивность подачи воды; интенсивность пожара; лесные пожары.*

Постановка задачи. Площадь земель лесного фонда непрерывно уменьшается. Одна из причин сокращения покрытых лесом площадей – лесные пожары. Ежегодно возникает до 400 000 лесных пожаров, повреждающих около 0,5 % общей площади всех лесов [1].

В последние годы увеличению количества пожаров способствует плановое выжигание территории для различных хозяйственных целей. Кроме того, владельцы мелких фермерских хозяйств используют выжигание или подсечно-огневой метод для подготовки земли. Пламя от такого выжигания местности нередко по недосмотру переходит границы предполагаемой территории и, особенно в периоды засухи, распространяется на соседние лесные массивы.

Лесные насаждения Донецкой Народной Республики занимают площадь более 50 000 га, из которых, по данным Управления лесного и охотничьего хозяйства ДНР, в Донбассе из-за пожаров в результате артобстрелов выгорели полностью 850 га.

За 2015 г. произошло девять пожаров на территории лесничеств, а за первое полугодие 2016 г. – четыре пожара, которыми уничтожено 0,5 га леса и 4,5 га лесной подстилки [2].

Лесные пожары подразделяют на три вида: низовые, верховые и подземные (торфяные). По частоте возникновения низовые пожары составляют 1 % от общего количества пожаров [3]. около 97 % от общего количества пожаров, верховые пожары 2 % и торфяные

Борьба с природными пожарами наиболее эффективна на начальном этапе их развития. Реализация решения такой задачи требует быстроты действия пожарных команд, которая, в свою очередь, зависит от мобильности используемых транспортных средств, разнообразия используемого пожарного оборудования и запасов огнетушащих веществ.

При тушении лесных пожаров применяют следующие способы и технические средства:

- захлестывание огня по кромке пожара ветками;
- засыпка кромки пожара грунтом;
- прокладка на пути распространения пожара заградительных и минерализованных полос (канав);
- пуск отжига (встречного низового и верхового огня);
- тушение горячей кромки водой;
- применение химических веществ;
- искусственное вызывание осадков из облаков [4].

Среди существующих технических средств для ликвидации лесных пожаров можно выделить ранцевые лесные огнетушители (РЛО).

Ранцевые огнетушители – специализированные приспособления. Тушение лесных пожаров с их применением достаточно эффективно. Преимущество лесных ранцевых огнетушителей – в удобстве их эксплуатации и возможности проведения мероприятий по устранению очагов возгорания при любых погодных условиях, однако область их наиболее эффективного применения ограничивается тушением низовых лесных пожаров.

Использование РЛО для тушения пожаров других типов в местах, где есть доступ к водным магистралям или традиционным огнетушителям крайне нецелесообразно, кроме того эксплуатация РЛО требует больших физических нагрузок [4]. Это связано с тем, что модельный ряд существующих РЛО ограничивается преимущественно выпуском приводимых в действие мускульной силой.

Учитывая актуальность проблемы сохранения лесного фонда, одной из главных задач дальнейших научных исследований можно считать создание нового ранцевого лесного огнетушителя, который не уступал бы по техническим характеристикам существующим малогабаритным средствам тушения лесного пожара и позволял уменьшить физические усилия человека во время ликвидации пожара.

Анализ последних исследований. В работах [1, 4, 5] рассмотрено множество видов оборудования и средств, предназначенных для тушения лесных пожаров. Применение существующего оборудования и средств на практике показало, что в ряде случаев они неэффективны, кроме того, такие технические средства имеют малую степень устойчивости и надежности работы в агрессивных условиях лесного пожара.

В статье [6] описаны экспериментальные исследования эффективности функционирования РЛО по линейной интенсивности подачи и расходу воды, необходимых для тушения низового лесного пожара.

Из широкого спектра работ по созданию и изучению оборудования, средств для ликвидации лесного пожара особое место занимают работы по совершенствованию РЛО. Вопрос целесообразности практического использования их остается недостаточно раскрытым.

Материалы и результаты исследований. Эффективность функционирования РЛО напрямую зависит от расхода воды и линейной интенсивности ее подачи.

Под линейной интенсивностью подачи воды понимается количество воды, подаваемое в единицу времени на единицу длины кромки низового лесного пожара, которое определяется опытным путём и расчётами при анализе потушенных лесных пожаров. При ширине кромки пожара, равной 1 м, линейная интенсивность подачи воды численно равна интенсивности подачи её по площади.

В табл. 1 приведены среднестатистические данные о скорости тушения кромки низовых лесных пожаров ранцевым лесным огнетушителем РЛО при подносе воды на расстояние до 100 м в зависимости от интенсивности пожара.

Таблица 1

Скорость тушения кромки низового пожара, м/ч

Вид низового пожара	Интенсивность пожара		
	высокая	средняя	низкая
Устойчивый	20...40	40...80	80...150
Беглый	30...50	50...100	100...200

Известны ранцевые лесные огнетушители РЛО-М, РП-18 Ермак, Вырица и другие. Определение расхода воды и линейной интенсивности подачи воды проведем по РЛО-М.

Расход воды Q , л/мин, при тушении кромки низового лесного пожара длиной 1 м низкой интенсивности определяют по формуле

$$Q = q\tau / L, \quad (1)$$

где q – подача гидропульты РЛО (2,25 л/мин);

τ – время тушения кромки лесного пожара (60 мин);

L – длина кромки низового лесного пожара (100 м).

К одному из основных диагностических признаков для определения интенсивности беглого низового пожара относят скорость его распространения. У пожара слабой интенсивности скорость до 1 м/мин, средней – от 1 до 3 м/мин, высокой – свыше 3 м/мин [3]. Результаты расчётов для других видов пожаров и интенсивностей подачи воды сведены в табл. 2.

Таблица 2

Расход воды при тушении кромки низового лесного пожара
длиной 1 м с использованием РЛО

Вид низового пожара	Интенсивность пожара		
	высокая	средняя	низкая
Расход воды, л/м			
Устойчивый	6,75...3,4	3,4...1,68	1,68...0,9
Беглый	4,5...2,7	2,7...1,35	1,35...0,68

Время подачи воды τ_0 (табл. 3) при тушении кромки низового лесного пожара длиной 1 м низкой интенсивности вычисляются по следующей формуле:

$$\tau_0 = \tau / L. \quad (2)$$

Таблица 3

Время подачи воды τ_0 на 1 м длины кромки пожара с использованием РЛО

Вид низового пожара	Интенсивность пожара		
	высокая	средняя	низкая
Время подачи воды, с			
Устойчивый	180...90	90...45	45...24
Беглый	120...72	72...36	36...18

Анализ результатов, сведенных в табл. 1, 2 и 3, показал, что даже при низкой интенсивности пожара расход воды будет значительным. Так, для тушения кромки низового пожара длиной 100 м необходимо будет от 68 до 135 л воды, а это от 4 до 8 заправок водой, что в свою очередь усложняет процесс бесперебойной подачи воды и тушения пожара.

Выводы. Выполненный анализ информации о РЛО и проведенные расчеты по определению расхода воды при тушении кромки низового лесного пожара и времени подачи воды на 1 м длины кромки пожара позволяют утверждать, что использование РЛО при больших расстояниях нецелесообразно из-за ограниченного количества воды и значительного расхода огнетушащего вещества.

Для решения данной проблемы необходимо семейство новых РЛО, которые будут иметь максимальный огнетушащий эффект при минимальных затратах огнетушащей жидкости, что в свою очередь будет способствовать уменьшению трудоемкости процесса тушения пожара и времени его ликвидации.

Список литературы / References

1. Теребнев, В.В. Противопожарная защита и тушение пожаров (леса, торфа, лесоскладов). Кн. 6 / В.В. Теребнев, Н.С. Артемьев. – М., 2006. – 295 с.
Terebnev, V.V., Artem'yev, N.S. *Protivopozharnaya zashchita i tusheniye pozharov (lesa, torfa, lesoskladov)* [Fire protection and fighting the fires (forest, peat, warehouses for storage of timbers)]. Book 6. Moscow, 2006, 295 p.
2. Нарушение правил пожарной безопасности [Электронный ресурс]. URL: <http://dnr-online.ru/narushenie-pravil-pozharnoj-bezopasnosti-v-lesax-privodit-k-administrativnoj-i-ugolovnoj-otvetstvennosti/> (дата обращения: 23.01.2017).
Narusheniye pravil pozharnoy bezopasnosti [Electronic resource]. Available at: <http://dnr-online.ru/narushenie-pravil-pozharnoj-bezopasnosti-v-lesax-privodit-k-administrativnoj-i-ugolovnoj-otvetstvennosti/> (assessed 23.01.2017).
3. Пахучий, В.В. Лесная пирология / В.В. Пахучий, В.А. Дробахин; Сыкт. лесн. ин-т. – Сыктывкар: СЛИ, 2013. – 60 с.
Pakhuchiy, V.V., Drobakhin, V.A. *Lesnaya pirologiya* [Forest pyrology]. Syktyvkar Forest Institute. Syktyvkar, SLI Publ., 2013, 60 p.
4. Щетинский, Е.А. Тушение лесных пожаров / Е.А. Щетинский. – Изд-е 3-е, перераб. и доп. – М.: ВНИИЛМ, 2002. – 104 с.
Shchetinskiy, Ye.A. *Tusheniye lesnykh pozharov* [Fighting the forest fires]. 3rd ed. rev. and suppl. Moscow, VNIILM Publ., 2002, 104 p.
5. Арцыбашев, Е.С. Наземные технические средства тушения лесных пожаров / Е.С. Арцыбашев, В.А. Белов, В.Г. Гусев // Тр. ФГУ СПбНИИЛХ: сб. науч. тр. / Санкт-Петербургский НИИ лесного хозяйства. – СПб., 2009. – Вып. 1 (18). – С. 186 – 208.
Artsybashev, Ye.S., Belov, V.A., Gusev, V.G. *Nazemnyye tekhnicheskiye sredstva tusheniya lesnykh pozharov* [Surface technical means of fighting the forest fires]. *Tr. FGU SPbNIILKh: sb. nauch. tr.* [Collected scientific papers of the FGU SPbNIILKh]. St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry, St. Petersburg, 2009, issue 1 (18), pp. 186 – 208.
6. Ресурсное обоснование сил и средств для тушения низового лесного пожара / С.В. Гундар, М.М. Данилов, А.Н. Денисов, И.Д. Опарин // Интернет-журнал «Технологии техносферной безопасности». – 2012. – Вып. № 2 (43). URL: <http://ipb.mos.ru/ttb> (дата обращения: 23.01.2017).
Gundar, S.V., Danilov, M.M., Denisov, A.N., Oparin, I.D. *Resursnoye obosnovaniye sil i sredstv dlya tusheniya nizovogo lesnogo pozhara* [The resource substantiation of the forces and means for fighting the creeping forest fire]. *Internet-zhurnal "Tekhnologii tekhnosfernoy bezopasnosti"* – *Internet-journal "Technologies of the environmental safety"*, 2012, issue 2 (43). Available at: <http://ipb.mos.ru/ttb> (accessed 23.01.2017).

Denis Aleksandrovich Timoshenko, commander; e-mail: denistimoshenko8293@gmail.com

The 59st fire-rescue unit of the State fire-rescue detachment of the MChS DPR

287100, urban settlement Telmanovo, 171, ulitsa Lenina. Phones +38 095 001-03-39; 071-311-73-74

BACKPACK FIRE EXTINGUISHERS FOR FIGHTING THE FOREST FIRES

Purpose. To determine the principal directions of working-out the backpack fire extinguishers for fighting the forest fires.

Methods. Analysis and generalization of materials on the existing backpack forest fire extinguishers to fight the forest fires.

Results. The principal directions of the working-out of the backpack fire extinguishers to fight the forest fires are assigned, the parameters of the function of the backpack forest fire extinguishers are substantiated.

Scientific novelty. The peculiarities of the function of the backpack forest fire extinguishers being actuated by the man power under the fire conditions are disclosed.

Practical value. The principal requirements to the developments of the backpack fire extinguishers for fighting the forest fires are stipulated.

Keywords: *backpack forest fire extinguisher; water discharge; linear intensity of water delivery; intensity of the fire; forest fires.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.8"363":546.171.1

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

Андрей Николаевич Жильцов, замнач. отд.; e-mail: zhiltsovan@mail.ru;

*Николай Поликарпович Жильцов, канд. хим. наук, замнач. отд.; e-mail: zhiltsovnp@mail.ru
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной
безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-39-95*

ОБРАЗОВАНИЕ ПАРОВ АММИАКА ПРИ АВАРИЙНЫХ ВЫБРОСАХ

Цель. Аналитическое моделирование процесса образования паров аммиака в результате разгерметизации резервуара с жидким аммиаком.

Методы. Аналитические исследования процесса образования паров аммиака при аварийных выбросах жидкого аммиака.

Результаты. Получена математическая модель образования паров на каждой стадии развития аварии с выбросом жидкого аммиака.

Научная новизна. Раскрыты особенности процесса образования паров при аварийной разгерметизации резервуара с жидким аммиаком.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют проводить расчеты количества газообразного аммиака, выделившегося в результате аварии с жидким аммиаком.

Ключевые слова: авария; выброс; жидкий аммиак; пары; парообразование; кипение; испарение.

Постановка задачи. Жидкий аммиак хранят только в наземных складах. Предприятия, применяющие его, часто расположены в черте крупных городов или в непосредственной близости от них. Это представляет большую опасность для населения. Поэтому необходимо принимать меры безопасности, чтобы максимально уменьшить последствия аварий, связанных с разрушением технологического оборудования или резервуаров с жидким аммиаком и выбросом последнего в атмосферу.

Поскольку именно пары аммиака представляют наибольшую опасность для населения и окружающей среды, подробно рассмотрим процесс образования паров при наихудшем из вариантов – аварийном полном разрушении резервуара с жидким аммиаком.

Анализ последних исследований. Существует методика [1] расчета концентрации аммиака в воздухе и распространения газового облака при авариях на складах жидкого аммиака. В ней приведены формулы для расчета количества аммиака, поступающего в окружающую среду в результате выброса жидкого аммиака. Формулы в основном базируются на широко распространенных эмпирических зависимостях, которые не учитывают механизма образования паров аммиака по стадиям и времени протекания процесса.

Цель исследования – аналитическое моделирование процесса образования паров аммиака при аварийных выбросах в результате разгерметизации резервуара с жидким аммиаком.

Результаты. При разрушении резервуара для хранения жидкого аммиака часть его испаряется и переходит в виде паров в атмосферу. Можно выделить несколько стадий образования паров аммиака в результате аварии с разрушением резервуара с жидким аммиаком:

- мгновенный выброс газообразного аммиака, находящегося в резервуаре над жидким аммиаком;
- образование паров аммиака за счет нарушения термодинамического баланса и высвобождения внутренней энергии системы;
- парообразование при кипении и испарении жидкого аммиака за счет теплоты подстилающей поверхности;
- парообразование при испарении с поверхности разлитого аммиака за счет теплопритока из окружающей среды и конвективных потоков воздуха.

В резервуарах для хранения аммиак находится в жидком и газообразном состоянии. Газ над жидкостью – под избыточным давлением. Следовательно, общая масса аммиака в резервуаре m , кг, в исходном состоянии определяется уравнением

$$m = m_{ж} + m^{\Gamma}, \quad (1)$$

где $m_{ж}$ – масса жидкого аммиака в резервуаре, кг;
 m^{Γ} – масса газообразного аммиака в резервуаре, кг.

В результате разрушения резервуара с жидким аммиаком его содержимое практически мгновенно выбрасывается наружу. Газообразный аммиак сразу же поступает в окружающую среду. Жидкий аммиак выливается в обваловку, предназначенную для уменьшения площади разлива в случае повреждения резервуара, а затем в приямок для сбора жидкого аммиака. Из приямка жидкий аммиак насосом перекачивают в резервную емкость.

При внезапном разрушении резервуара происходит резкое изменение состояния жидкого аммиака. Освобождающийся в результате запас внутренней энергии термодинамической системы идет на парообразование. За счет нарушения термодинамического баланса и резкого изменения давления происходит «мгновенное» бурное вскипание жидкости. При этом определенное количество жидкого аммиака образует аэрозоль (взвесь капель аммиака в парах).

Часть капель, за счет высвобождения внутренней энергии, переходит в газообразное состояние и поступает в окружающую среду, а другая – за счет сил гравитации опускается на подстилающую поверхность. В результате температура жидкого аммиака снижается до температуры кипения при атмосферном давлении.

В результате попадания жидкого аммиака с температурой кипения при атмосферном давлении на «горячую» подстилающую поверхность происходит бурное вскипание жидкости. Часть жидкого аммиака, за счет теплоотдачи

подстилающей поверхности, стенок обваловки, фундамента резервуара, а также части самого резервуара, будет нагреваться, кипеть и переходить в газообразное состояние.

Кипение за счет теплопритока от подстилающей поверхности будет длиться до тех пор, пока температура материала подстилающей поверхности не достигнет температуры жидкого аммиака. В результате этого существенно уменьшится теплоприток из глубины подстилающей поверхности. Следует отметить, что обе эти стадии взаимосвязаны и протекают одновременно. Вклад каждой стадии зависит от разности температур жидкого аммиака и подстилающей поверхности.

В газообразное состояние переходит также часть жидкого аммиака, которая испаряется за счет теплопритока из окружающей среды и конвективных потоков воздуха с поверхности разлитого аммиака, находящегося в обваловке, за время перекачивания его насосом в резервную емкость или полного испарения.

Следовательно, массу жидкого аммиака $m_{ж}$, кг, вылившегося из резервуара в результате аварийного разрушения, в итоге можно представить следующим уравнением:

$$m_{ж} = m_{п} + m^a + m^b + m^и, \quad (2)$$

где $m_{п}$ – масса жидкого аммиака, перекачанная в резервную емкость, кг;

m^a – масса газообразного аммиака, образующегося при испарении за счет нарушения термодинамического баланса, кг;

m^b – масса газообразного аммиака, образующегося при кипении и испарении за счет теплопритока от подстилающей поверхности, кг;

$m^и$ – масса газообразного аммиака, образующегося при испарении с поверхности разлитого аммиака, находящегося в обваловке, за счет теплоотдачи воздушного потока, кг.

Общую массу газообразного аммиака, образующегося в результате аварийного разрушения резервуара по данному сценарию, $m_{г}$ можно представить с учетом уравнений (1) и (2) в следующем виде:

$$m_{г} = m^г + m^a + m^b + m^и. \quad (3)$$

Рассмотрим каждую стадию образования газообразного аммиака в результате разрушения резервуара с жидким аммиаком.

В соответствии с уравнением Клапейрона-Менделеева (уравнение состояния идеального газа) масса газообразного аммиака, находящегося в резервуаре над жидкостью под давлением, в исходном состоянии равна

$$m^г = \alpha \frac{\mu}{R} \frac{VP_p}{T_p}, \quad (4)$$

где α – объемная доля резервуара, заполненного газообразным аммиаком;
 R – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);
 μ – молярная масса аммиака, кг/моль;
 P_p – давление в резервуаре, Па;
 T_p – температура аммиака в резервуаре, К;
 V – объем резервуара, м³.

Чем выше давление в резервуаре и ниже температура хранения при этом давлении, тем больше газообразного аммиака находится над жидкостью.

Массу газообразного аммиака m^a , образующегося при мгновенном вскипании жидкости за счет высвобождения внутренней энергии, можно определить по уравнению

$$m^a = \beta m_{ж}, \quad (5)$$

где β – доля газообразного аммиака, образующегося за счет высвобождения внутренней энергии при аварийном выбросе;

$$\beta = 1 - \exp\left(-C_p \frac{T_p - T_{кип}}{\Delta H_{кип}}\right), \quad (6)$$

где $\Delta H_{кип}$ – удельная теплота парообразования жидкого аммиака при температуре кипения, кДж/кг;

$T_{кип}$ – температура кипения жидкого аммиака, К;

C_p – удельная теплоемкость жидкого аммиака, кДж/(кг·К).

Чем выше температура жидкого аммиака в резервуаре, тем больше газообразного аммиака образуется при аварийной разгерметизации резервуара.

Массу газообразного аммиака m^b , образующегося при кипении и испарении разлитого жидкого аммиака, который находится в обваловке, за счет теплопритока от подстилающей поверхности, определяем по уравнению

$$m^b = I_{кип} S_{конт} t_{кип}, \quad (7)$$

где $I_{кип}$ – интенсивность образования паров аммиака за счет теплоотдачи подстилающей поверхности, кг/(м²·с);

$t_{кип}$ – время парообразования аммиака за счет теплоотдачи подстилающей поверхности, с;

$S_{конт}$ – площадь поверхности контакта жидкого аммиака с подстилающей поверхностью при проливе, м².

Интенсивность образования паров аммиака при кипении рассчитывают по уравнению, учитывающему теплофизические свойства аммиака и материала подстилающей поверхности:

$$I_{\text{кип}} = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}}{\Delta H_{\text{кип}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}}{\pi t_{\text{кип}}}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{п}}$ – температура подстиляющей поверхности, К;

$\lambda_{\text{п}}$ – коэффициент теплопроводности подстиляющей поверхности, Вт/(м·К);

$\rho_{\text{п}}$ – плотность материала подстиляющей поверхности, кг/м³;

$c_{\text{п}}$ – теплоемкость подстиляющей поверхности, Дж/(кг·К).

На данной стадии процесса образования паров аммиака большую роль играет тип подстиляющей поверхности. Это характерно и для других легких, по отношению к воздуху, газов: метана [2] и азота [3].

Следует отметить, что массу паров аммиака, образующихся при кипении за счет теплопритока от подстиляющей поверхности, в работе [1] рассчитывают по уравнению

$$m^{\text{в}} = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{кип}} + |T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}|}{\Delta H_{\text{кип}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}}{\pi}} \frac{S_{\text{конт}}^2}{S} \sqrt{t_{\text{кип}}}, \quad (9)$$

где S – площадь поверхности пролива жидкого аммиака, м².

При сравнении уравнений (7) и (8), с одной стороны, и (9), с другой, нетрудно заметить, что рассчитанная по ним масса образующихся паров аммиака на этой стадии отличается, по крайней мере, в два раза. Из решения уравнения (9) видно, что даже через 1 ч происходит кипение жидкого аммиака за счет теплопритока от подстиляющей поверхности.

Поэтому в работе [1] введена формула для определения времени кипения жидкого аммиака за счет теплопритока от подстиляющей поверхности:

$$\sqrt{t_{\text{кип}}} = \frac{T_{\text{п}} - T_{\text{кип}} + |T_{\text{п}} - T_{\text{кип}}|}{2\Delta H_{\text{кип}}} \sqrt{\frac{\lambda_{\text{п}} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}}{\pi}} \frac{1}{q^{\text{и}}} \frac{S_{\text{конт}}}{S}, \quad (10)$$

где $q^{\text{и}}$ – удельная скорость испарения аммиака с единицы площади, кг/(м²·с).

При этом следует отметить, что удельную скорость (интенсивность) испарения предлагают рассчитывать по уравнению

$$q^{\text{и}} = \sqrt{\mu} 10^{-6} (5,38 + 4,1v) \rho_{\text{н}}, \quad (11)$$

где $\rho_{\text{н}}$ – давление насыщенного пара аммиака при температуре воздуха, Па;

v – скорость ветра на высоте 10 м, м/с.

Однако данное соотношение характеризует процесс испарения аммиака с поверхности пролива, а не кипение жидкого аммиака.

Давление насыщенного пара аммиака при температуре воздуха $T_{\text{возд}}$, К, в этом случае рассчитывают по известному уравнению Клапейрона-Клаузиуса:

$$\rho_{\text{н}} = 760 \exp \left[\frac{\mu \Delta H_{\text{кип}}}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{кип}}} - \frac{1}{T_{\text{возд}}} \right) \right]. \quad (12)$$

Однако использование в данном выражении температуры воздуха в лучшем случае некорректно, поскольку температура паров над жидким аммиаком всегда меньше температуры воздуха. Замена расчетной температуры паров в уравнении Клапейрона-Клаузиуса значениями температуры воздуха приводит к завышенным значениям давления насыщенных паров. Так, при температуре воздуха 239,75 К давление насыщенных паров равно 0,1 МПа (атмосферное давление), а при 303,15 К равно 1,24 МПа. Такое давление насыщенного пара может быть только в замкнутых системах и при равных температурах паров и жидкости. Естественно, что при этом завышаются и значения интенсивности образования паров при испарении с зеркала пролива жидкого аммиака.

Следует отметить, что аналогичный вопрос решен в работе [4] для случая выброса «тяжелых» газов в атмосферу.

Кроме этого, расчет времени кипения аммиака за счет теплопритока от подстилающей поверхности по уравнению (10) приводит к некорректным значениям (в зависимости от размерности величины μ). Эти вопросы требуют решения, поскольку указанные уравнения являются основой для дальнейших расчетов с учетом концентрации образующихся паров аммиака.

По мере охлаждения подстилающей поверхности тепловой поток от нее к жидкому аммиаку уменьшается и кипение прекращается. Далее преобладает диффузное испарение жидкого аммиака. Этот процесс зависит от физико-химических свойств аммиака, температуры и подвижности воздушного потока. Более подробно данный процесс освещен в работе [5].

Следовательно, масса газообразного аммиака, образующегося при испарении с поверхности разлитого аммиака, который находится в обваловке, может быть рассчитана по уравнению

$$m^{\text{и}} = I_{\text{исп}} S t_{\text{исп}}, \quad (13)$$

где $I_{\text{исп}}$ – интенсивность образования паров при испарении с зеркала пролива жидкого аммиака, кг/(м²·с);

$t_{\text{исп}}$ – время парообразования аммиака при испарении с зеркала пролива, с.

Наиболее приемлемым уравнением для расчета интенсивности образования паров при испарении с зеркала пролива жидкого аммиака является эмпирическое уравнение, которое одновременно учитывает свойства аммиака и окружающей среды, температуру и подвижность воздушного потока:

$$I_{\text{исп}} = 0,035 v_n^{0,8} \lambda_a \frac{T_{\text{возд}} - T_{\text{кип}}}{\Delta H_{\text{кип}}} v_a^{0,8} d^{0,2}, \quad (14)$$

где λ_a – коэффициент теплопроводности воздуха при $T_{\text{возд}}$, Вт/(К·м);

v_n – скорость воздушного потока над поверхностью испарения, м/с;

v_a – кинематическая вязкость воздуха при $T_{\text{возд}}$, м²/с;

d – характерный диаметр пролива, м.

Кроме вышеперечисленных факторов, необходимо также учитывать и другие (солнечная радиация, состояние атмосферы, конденсация водяного пара и т.д.), оказывающие влияние на массу образующегося газообразного аммиака при аварийных выбросах [6]. Однако данные по этим исследованиям противоречивы.

Выводы. Проведенные аналитические исследования позволяют рассчитать массу паров, образующихся на каждой из четырех наиболее значимых стадий развития аварии в результате разгерметизации резервуара с жидким аммиаком. Полученные данные необходимы для разработки эффективной системы нейтрализации высокотоксичных паров аммиака.

Список литературы / References

1. Методика расчета концентраций аммиака в воздухе и распространения газового облака при авариях на складах жидкого аммиака // Методики оценки последствий аварий на опасных производственных объектах: сб. документов. Серия 27. – Вып. 2. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: ЗАО НТЦИППБ, 2010. – С. 81 – 122.

Metodika raschyeta kontsentratsiy ammiaka v vozdukh i rasprostraneniya gazovogo oblaka pri avariakh na skladakh zhidkogo ammiaka [Methods of calculation of ammonia concentrations in air and of propagation of the gas cloud by emergencies in liquid ammonia storages]. *Metodiki otsenki posledstviy avari na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh: sb. dokumentov* [Methods of estimation of consequences of emergencies at hazardous manufacturing entities: collection of documents]. Series 27, issue 2, 3rd ed. rev. and suppl. Moscow, ZAO NTTsIPPB Publ., 2010, pp. 81 – 122.

2. Пожаровзрывобезопасность объектов хранения сжиженного природного газа. Анализ состояния проблемы / И.А. Болодьян [и др.] // Пожарная безопасность. – 2000. – № 2. – С. 86 – 96.

Bolod'yan, I.A. etc. *Pozharovzryvobezopasnost' ob'yektov khraneniya szhizhennogo prirodnogo gaza. Analiz sostoyaniya problemy* [Fire-explosion safety of liquefied natural gas storage objects. Analysis of the state of a problem]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2000, no. 2, pp. 86 – 96.

3. Старовойтова, Е.В. Экспериментальное исследование интенсивности парообразования сжиженного газа / Е.В. Старовойтова, А.Д. Галеев, С.И. Поникаров // Вестник Казан. технол. ун-та. – 2012. – Т. 15, № 9. – С.70 – 71.

Starovoytova, Ye.V., Galeev, A.D., Ponikarov, S.I. *Ekspperimental'noye issledovaniye intensivnosti paroobrazovaniya szhizhennogo gaza* [The experimental

investigation of intensity of vaporization of the liquefied gas]. *Vestnik Kazan. tekhnol. un-ta* [Bulletin of the Kazan technol. univ.]. 2012, vol. 15, no. 9, pp. 70 – 71.

4. Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ. Серия 27. – Вып. 11. – М.: ЗАО НТЦИППБ, 2015. – 130 с.

Metodika modelirovaniya rasprostraneniya avariynykh vybrosov opasnykh veshchestv [Methods of modeling of propagation of escapes of hazardous substances]. Series 27, issue 11. Moscow, ZAO NTTsIPPB Publ., 2015, 130 p.

5. Кочетов, Н.М. Моделирование процесса парообразования сжиженных газов при их аварийном разливе / Н.М. Кочетов // Проблемы анализа риска. – 2009. – Т. 6, № 3. – С. 64 – 71.

Kochetov, N.M. *Modelirovaniye protsessa paroobrazovaniya szhizhennykh gazov pri ikh avariynom razlive* [Modeling of the process of vaporization of the liquefied gases by their accidental spill]. *Problemy analiza riska – Problems of analysis of a risk*, 2009, vol. 6, no. 3, pp. 64 – 71.

6. Старовойтова, Е.В. Оценка последствий аварийного выброса сжиженного аммиака с использованием программы FLUENT / Е.В. Старовойтова, А.Д. Галеев, С.И. Поникаров // Безопасность труда в пром-сти. – 2011. – № 12. – С. 47 – 51.

Starovoytova, Ye.V., Galeev, A.D., Ponikarov, S.I. *Otsenka posledstviy avariynogo vybrosa szhizhennogo ammiaka s ispol'zovaniyem programmy FLUENT* [Estimation of consequences of the accidental escape of the liquefied ammonia with the use of the FLUENT program]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Labor safety in the industry*, 2011, no. 12, pp. 47 – 51.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 26.01.2017

Pyotr Semyonovich Pashkovskiy, Dr. Sci. (Tech.), first deputy director on science;

e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru;

Andrey Nikolayevich Zhiltsov, deputy head of department; e-mail: zhiltsovan@mail.ru;

Nikolay Polikarpovich Zhiltsov, Cand. of Chemistry, deputy head of department;

e-mail: zhiltsovnp@mail.ru

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 311-39-95

GENERATION OF AMMONIA VAPORS BY ACCIDENTAL ESCAPES

Purpose. The analytical modeling of the process of generation of the ammonia vapors as a result of depressurization of a tank with the liquefied ammonia.

Methods. Analytical investigations of the process of generation of the ammonia vapors by accidental escapes of the liquid ammonia.

Results. The mathematical model of generation of the vapors at each stage of development of the accident with the escape of the liquid ammonia has been obtained.

Scientific novelty. The peculiarities of the process of generation of the vapors by the accidental depressurization of the tank with the liquefied ammonia are disclosed.

Practical value. The results received allow calculating the quantity of the gaseous ammonia isolated as a result of the accident with the liquid ammonia.

Keywords: accident; escape; liquid ammonia; vapors; vaporization; boiling; evaporation.

УДК 614.841.22:536.244

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

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

Кристина Валериевна Глушенко, инж. I кат.; 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) 311-13-52; 311-69-51

РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОТДАЧИ В СЛОЕ ЗЕРНИСТОГО ВЕЩЕСТВА

Цель. Усовершенствование метода определения коэффициентов теплоотдачи в дисперсных средах на основании теоретического описания процесса очагового самонагрева веществ и экспериментальных данных.

Методика основана на математической модели очагового самонагрева органических дисперсных веществ за счет химических реакций окисления и литературных данных.

Результаты. Показано, что при хранении дисперсных органических веществ в замкнутых объемах имеют место случаи очагового самовозгорания, приводящего к пожару. Передача теплоты внутри дисперсной среды осуществляется теплопроводностью с коэффициентом теплоотдачи, характерным для данного вещества. Предложено использование разработанной ранее математической модели очагового самонагрева дисперсного вещества и совместно с имеющимися экспериментальными данными путём моделирования процесса определения коэффициентов теплоотдачи. На примере литературных данных по самонагреванию в скоплении травяной муки показан метод расчёта коэффициентов теплоотдачи. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с данными В.Н. Тимофеева, Т. Шервуда, Б.Д. Канцельсона, П.Г. Романкова.

Научная новизна. Предложен метод определения коэффициентов теплоотдачи, отличающийся от существующих тем, что моделируется процесс реально развивающегося очагового самонагрева дисперсного вещества с помощью предлагаемой математической модели и с учётом определённых в лабораторных условиях теплофизических характеристик вещества.

Практическая значимость. Полученные данные используют при определении допустимого размера скопления дисперсного органического вещества, исключая его самовозгорание.

Ключевые слова: самовозгорание; теплоотдача; критерии Био и Фурье; инкубационный период; органическое вещество.

Состояние вопроса. Процесс самонагрева органических веществ обычно изучается в условиях их теплоизоляции (уголь в бункерах, зерно в хранилищах, комбикорм в мешках, окружённых слоем таких же мешков, что препятствует поступлению к ним воздуха и ограничивает теплоотдачу и пр.) и в условиях, приближенных к промышленным, когда происходит потеря теплоты в окружающую среду. Процессы теплоотдачи в этих случаях существенно различаются.

В первом случае в реагирующей системе в начальный момент времени реакция протекает одновременно не во всем объёме, а в областях, где выделение теплоты значительно отличается от общей картины тепловыделения и носит очаговый характер. Критические условия самовозгорания помимо

реакционных свойств веществ зависят от интенсивности теплообмена и его теплофизических свойств. По мнению автора [1], важную роль в определении положения критической точки самовоспламенения по отношению к температуре окружающей среды играет критерий Био. При малых его значениях критическая температура принимает минимальное из возможных значений и по мере роста этого критерия температура самовозгорания повышается, и только при $Bi \rightarrow \infty$ зависимость критического условия от параметра Био исчезает. Отсюда следует, что для вычисления Bi необходимо располагать сведениями о коэффициенте теплоотдачи, характеризующем теплообмен между веществом с более и менее нагретыми его частями внутри замкнутой системы.

Проблема тепломассообмена в дисперсных средах рассмотрена в ряде работ [2, 3]. Обычно коэффициенты теплообмена α , Вт/(м²·К), и массообмена β , м/с, при нагревании (остывании) кускового вещества представляют в виде критериальных зависимостей

$$Nu = f(Re, Pr); \quad Nu_q = f(Pe), \quad (1)$$

причем для неподвижной среды, когда тепло- и массообмен протекают за счет молекулярной диффузии, принимается $Nu = Nu_q = 2$.

Поскольку в слое дисперсных частиц контактная поверхность S не определена, авторы работы [2] рекомендуют использовать объемные коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи:

$$Nu = \frac{6\alpha}{S\lambda_T}; \quad Nu_q = \frac{\beta d}{D} = \frac{6\beta}{SD}, \quad (2)$$

где $\varphi = 0,8 \dots 0,9$ – коэффициент формы;

$S = S_q/V$ – поверхность в единице объема, м⁻¹;

S_q – поверхность частиц, м²;

V – объем частиц, м³;

λ_T – теплопроводность газа, Вт/(м·К);

d – диаметр частиц, м;

D – коэффициент диффузии, м²/с;

β – коэффициент массоотдачи, м/с.

В работе [4] приведены сводные данные для вычисления коэффициентов теплоотдачи и массоотдачи, полученные различными исследователями, их численное значение для случаев засыпки сухими и влажными частицами угля, гипса, известняка, руды и другими кусковатыми веществами размером от 2 до 30 мм, и некоторые результаты расчетов для скоплений угля при их продувке воздухом с наиболее пожароопасными скоростями.

Анализ литературных данных показал, что для скорости потока $v = 4 \cdot 10^{-4}$ м/с (одна из наиболее пожароопасных) результаты расчёта коэффициентов теплоотдачи по формулам В.Н. Тимофеева, Т. Шервуда, Б.Д. Канцельсона, П.Г. Романкова составляют порядка 0,02...0,08 Вт/(м²·К). Расчёты по формуле А.Н. Щербаня дают результат примерно на порядок выше.

При малых скоростях формулы Т. Шервуда и П.Г. Романкова по определению коэффициента массоотдачи совпадают. Однако формула П.Г. Романкова несколько более общая, так как учитывает разность температур между потоком и частицами вещества в насыпи, что очень важно при рассмотрении самонагрева частиц угля в скоплении.

Сложность использования приведенных зависимостей в том, что они не пригодны для расчетов при малом размере зёрен адсорбента, а при малом размере частиц (типа муки) значение S оказывается столь большим, что значения полученных α – нереально велики.

Цель исследований. Усовершенствовать метод определения коэффициентов теплоотдачи в слое зернистого вещества.

Материалы и результаты исследований. Предлагаемый метод основан на изучении динамики полей температур в скоплении дисперсного вещества с очагом нагревания (самонагревания) в центре в различные моменты времени и сравнении их с теоретическими полями, полученными решением соответствующей математической модели. Условия эксперимента таковы, что крайняя от центра нагревания граница изучаемых полей температур в течение всего времени эксперимента не превышала температуру окружающей среды и таким образом минимизировалось бы влияние теплоотдачи на границе скопления.

В качестве математической модели очагового самонагревания дисперсного вещества принята предложенная ранее модель [4, 5]. Учитывая, что в дисперсной среде критерий Bi невелик, решение задачи может быть представлено в виде

$$\bar{T} = \frac{T(\bar{R}_0 Fo)}{T_0} = 1 + \frac{1 - \left[\exp \Gamma_T Fo \right]^{-\Gamma_v} \sin \left(\bar{R} \sqrt{3Bi} \right)}{\Gamma_v \bar{R} \sqrt{3Bi}}, \quad (3)$$

где $\bar{R} = r/R$ – относительный радиус изучаемого поля температур;
 r, R – переменный радиус и радиус поля самонагреваемого вещества, м;

$\Gamma_v = \frac{3Bi}{\Gamma_T} - 1$ – показатель скорости самонагревания вещества;

$Bi = \alpha R / \lambda$ – критерий Bi ;

α – коэффициент теплоотдачи вещества, Вт/(м²·К);

λ – коэффициент теплопроводности вещества, Вт/(м·К);

$$\Gamma_T = A \frac{R^2}{a_T} - \text{комплексный критерий генерации теплоты};$$

A – показатель, характеризующий самонагревающееся вещество, с;

a_T – коэффициент температуропроводности вещества, м²/с;

$$Fo = a_T t / R^2 - \text{критерий Фурье};$$

t – время, с.

Согласно выражению (3) температура в центре очага самонагревания для одного и того же вещества зависит от трех критериев – генерации теплоты Γ_T , теплоотдачи Bi и времени Fo . Динамика полей температур по радиусу вещества для тех же моментов времени Fo определяется только вторым множителем

второго члена выражения (3), то есть соотношением $\frac{\sin\left(\bar{R} \sqrt{3Bi}\right)}{\bar{R} \sqrt{3Bi}}$. Таким

образом, в экспериментально определённом поле температур необходимо моделировать изменение \bar{R} и Bi при фиксированном времени Fo . Для наглядности и визуального сравнения измеренного и теоретического распределения температур по радиусу скопления вещества на рис. 1

представлены соотношения $\frac{\sin\left(\bar{R} \sqrt{3Bi}\right)}{\bar{R} \sqrt{3Bi}}$ для практически нужных значений Bi .

Значения Bi , определённые путём моделирования полей температур для каждого времени t , используют при расчёте коэффициентов теплоотдачи α , Вт/(м²·К), по формуле

$$\alpha = \frac{\lambda Bi}{R}. \quad (4)$$

Величину λ в зависимости от температуры T , К, самонагреваемого вещества рассчитывают по формуле

$$\lambda = a + bT, \quad (5)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от типа вещества.

Затем находим зависимость α от разности температур в центре и на периферии или от средней температуры скопления.

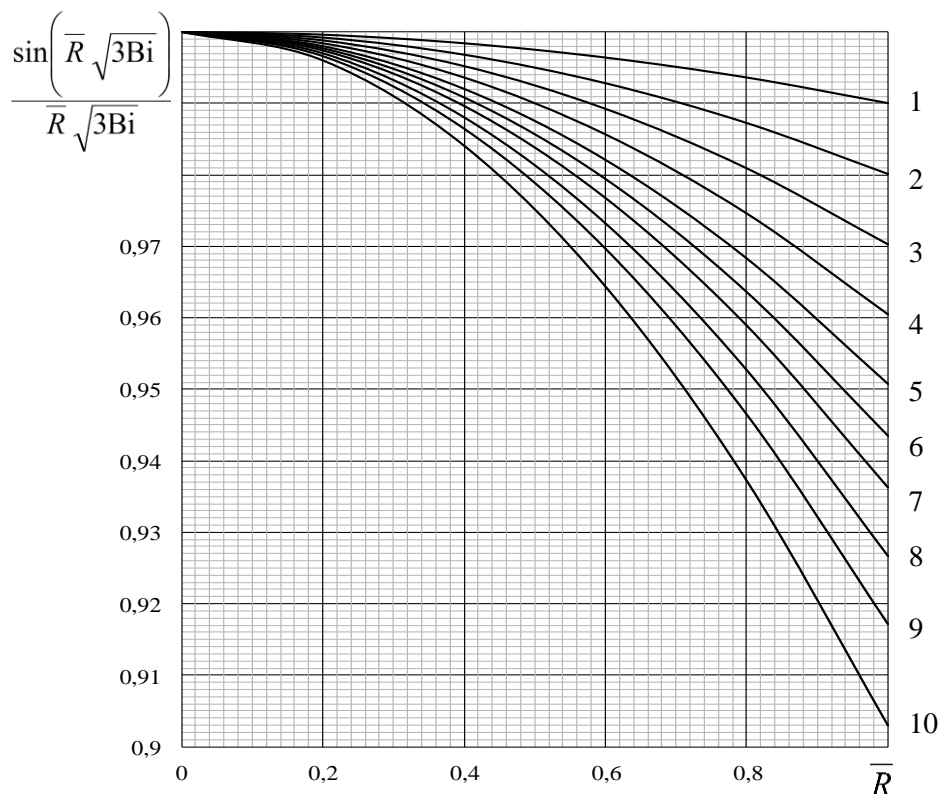


Рис. 1. Зависимость соотношения $\frac{\sin\left(\bar{R}\sqrt{3Bi}\right)}{\bar{R}\sqrt{3Bi}}$ от безразмерного радиуса \bar{R} при

разных значениях критерия Bi :

1 – $Bi=0,02$; 2 – $Bi=0,04$; 3 – $Bi=0,06$; 4 – $Bi=0,08$; 5 – $Bi=0,1$; 6 – $Bi=0,115$;
7 – $Bi=0,13$; 8 – $Bi=0,15$; 9 – $Bi=0,17$; 10 – $Bi=0,2$

Для примера использования предлагаемого метода расчёта коэффициентов теплоотдачи в дисперсной среде воспользуемся экспериментальными данными авторов [6] по самонагреванию травяной муки в скоплениях с плотностью $\rho = 230$ и 307 кг/м³ и примерно одинаковой влажностью. В обоих экспериментах радиус насыпи равен $R = 0,3$ м, а коэффициенты a и b в формуле (5) – $0,04$ и $0,00017$ соответственно.

На рис. 2 и 3 представлены экспериментальные данные авторов [6] и расчётные данные по формуле (3) полей температур (см. таблицу) в самонагревающейся травяной муке через 2, 3 и 4 сут с момента начала

процесса. Для моделирования полей температуры по зависимости $\frac{\sin\left(\bar{R}\sqrt{3Bi}\right)}{\bar{R}\sqrt{3Bi}}$

значения температуры T и координаты R представлены в безразмерном виде

$$T\Big|_{r=R}/T\Big|_{r=0} = f(r/R).$$

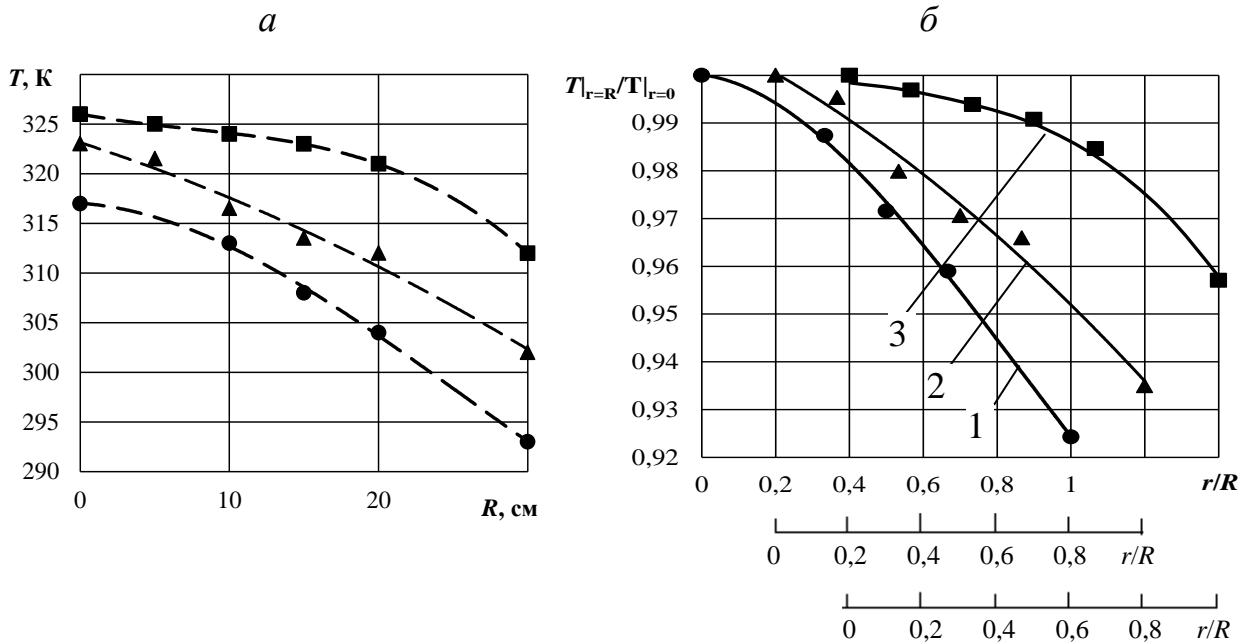


Рис. 2. Экспериментальные (а) и расчетные данные (б) изменения температуры в насыпи травяной муки плотностью 230 кг/м³ через 2 (●), 3 (▲) и 4 сут (■) с момента начала самонагревания; 1 – $Bi = 0,175$; $\alpha = 0,052$ Вт/(м²·К); 2 – $Bi = 0,138$; $\alpha = 0,041$ Вт/(м²·К); 3 – $Bi = 0,09$; $\alpha = 0,027$ Вт/(м²·К)

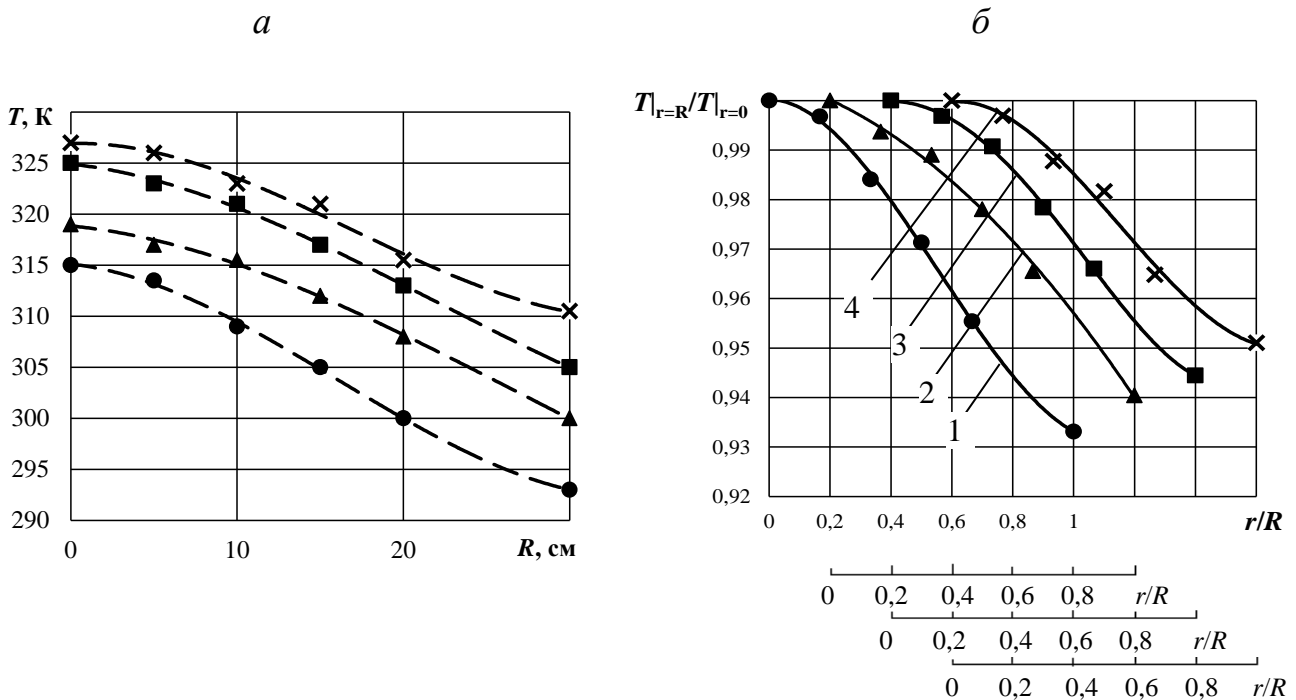


Рис. 3. Экспериментальные (а) и расчётные данные (б) изменения температуры в насыпи травяной муки плотностью 307 кг/м³ через 2 (●), 3 (▲) и 4 (■) и 5 сут (×) с момента начала самонагревания; 1 – $Bi = 0,175$; $\alpha = 0,052$ Вт/(м²·К); 2 – $Bi = 0,15$; $\alpha = 0,045$ Вт/(м²·К); 3 – $Bi = 0,13$; $\alpha = 0,039$ Вт/м²; 4 – $Bi = 0,115$; $\alpha = 0,035$ Вт/м²

Среднюю по радиусу температуру в скоплении вещества находили по формуле (3) с усреднённой по радиусу величиной $\frac{\sin\left(\frac{R}{\sqrt{3Bi}}\right)}{R\sqrt{3Bi}}$, определяемой по формуле

$$\int_0^x (ax)^n \sin ax dx = - \sum_{k=0}^n k! \binom{n}{k} \frac{x^{n-k}}{a^{k+1}} \cos \left(ax + \frac{1}{2} k\pi \right), \quad (6)$$

где $x = r/R$; $a = \sqrt{3Bi}$; $n = -1$.

Экспериментальные данные и результаты моделирования процесса самонагрева травяной муки

$t = 2$ сут	$t = 3$ сут	$t = 4$ сут	$t = 5$ сут
Эксперимент с плотностью насыпи вещества $\rho = 230$ кг/м ³			
$T _{r=0} = 317$ К $T _{r=R} = 293$ К $\Delta T = 24$ °С $Bi = 0,175$ $T_{cp} = 305$ К $\alpha = 0,052$ Вт/(м ² ·К)	$T _{r=0} = 323$ К $T _{r=R} = 302$ К $\Delta T = 21$ °С $Bi = 0,138$ $T_{cp} = 312,5$ К $\alpha = 0,043$ Вт/(м ² ·К)	$T _{r=0} = 326$ К $T _{r=R} = 312$ К $\Delta T = 14$ °С $Bi = 0,09$ $T_{cp} = 319$ К $\alpha = 0,035$ Вт/(м ² ·К)	...
Эксперимент с плотностью насыпи вещества $\rho = 307$ кг/м ³			
$T _{r=0} = 315$ К $T _{r=R} = 293$ К $\Delta T = 22$ °С $Bi = 0,175$ $T_{cp} = 304$ К $\alpha = 0,052$ Вт/(м ² ·К)	$T _{r=0} = 319$ К $T _{r=R} = 300$ К $\Delta T = 19$ °С $Bi = 0,150$ $T_{cp} = 309,5$ К $\alpha = 0,045$ Вт/(м ² ·К)	$T _{r=0} = 325$ К $T _{r=R} = 305$ К $\Delta T = 20$ °С $Bi = 0,13$ $T_{cp} = 315$ К $\alpha = 0,039$ Вт/(м ² ·К)	$T _{r=0} = 327$ К $T _{r=R} = 310,5$ К $\Delta T = 16,5$ °С $Bi = 0,115$ $T_{cp} \approx 318,8$ К $\alpha = 0,037$ Вт/(м ² ·К)

С целью обобщения полученных результатов построим зависимости коэффициентов теплоотдачи α от средних температур между границами скоплений и разности температур на границах для различных моментов времени (рис. 4).

Представленные на рис. 4 зависимости свидетельствуют о том, что в отсутствии разности температур в каком-либо месте скопления вещества коэффициент теплоотдачи равен нулю, что соответствует процессу переноса теплоты. Определённые численные значения коэффициентов теплоотдачи травяной муки в начальный период самонагрева равны примерно 0,05 Вт/(м²·К) и несколько уменьшались с ростом температур, что вызвано,

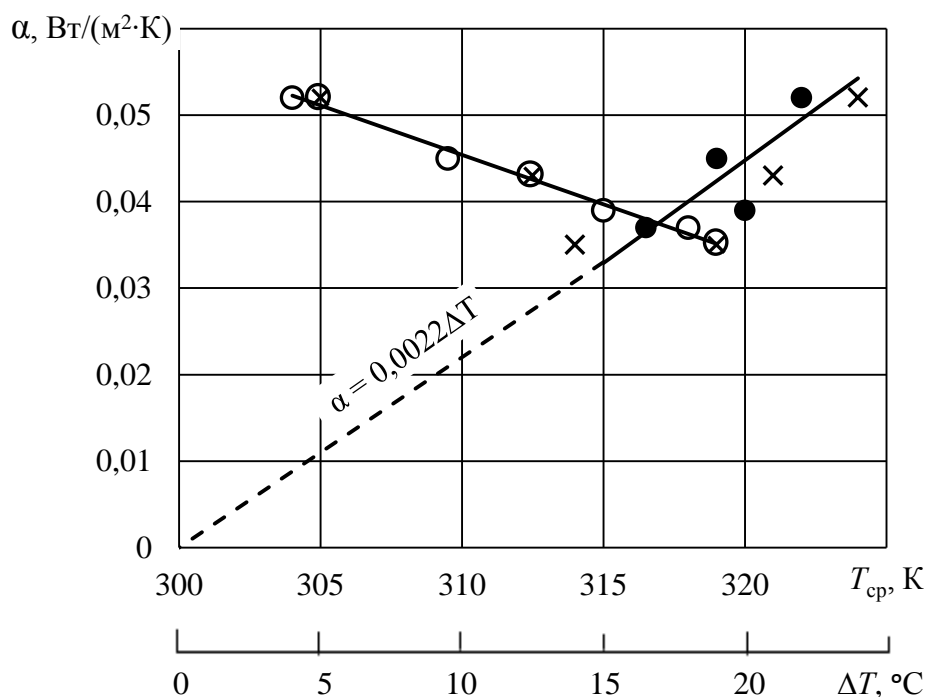


Рис. 4. Зависимость расчётных коэффициентов теплоотдачи α , Вт/(м²·К), от средних температур T_{cp} , К, между границами скоплений и разности температур ΔT , °С, на границах для разных моментов времени:

- ⊗ – зависимость α от T_{cp} для насыпи плотностью $\rho = 230$ кг/м³;
- × – зависимость α от ΔT для насыпи плотностью $\rho = 230$ кг/м³;
- – зависимость α от T_{cp} для насыпи плотностью $\rho = 307$ кг/м³;
- – зависимость α от ΔT для насыпи плотностью $\rho = 307$ кг/м³

возможно, снижением влажности вещества в результате его испарения. Полученные результаты удовлетворительно согласуются с коэффициентами теплоотдачи, определёнными по другим методикам [7, 8].

Выводы. Предложен метод определения коэффициентов теплоотдачи α в дисперсной среде при отсутствии конвективного переноса теплоты. Определены численные значения указанного параметра для случая очагового самонагрева травяной муки в насыпи с плотностью от 230 до 307 кг/м³.

Список литературы / References

1. 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.
2. Романков, П.Г. Массообменные процессы в химической технологии / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.

Romankov, P.G., Frolov, V.F. *Massoobmennyye protsessy v khimicheskoy tekhnologii* [Mass-transfer processes in the chemical technology]. Leningrad, Khimiya Publ., 1990, 384 p.

3. Шервуд, Т. Массопередача / Т. Шервуд, Р. Пигфорд, Ч. Уилки. – М.: Химия, 1982. – 695 с.

Sherwood, T., Pigford, R., Wilke, Ch. *Massoperedacha* [Mass transfer]. Moscow, Khimiya Publ., 1982, 695 p.

4. Греков, С.П. Расчёт параметров тепло- и массообмена в самонагреваемом угольном скоплении / С.П. Греков, И.Н. Зинченко // Горноспасательное дело: сб. науч. тр./ НИИГД. – Донецк, 2007. – Вып. 44. – С. 26 – 33.

Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Raschyet parametrov teplo- i massoobmena v samonagrevayushchemsya ugol'nom skoplenii* [Calculation of heat and mass transfer parameters in the self-heating coal accumulation]. *Gornospasatel'noye delo, sb.nauch. tr. / NIIGD* [Proc. of the NIIGD “Mine-rescue work”]. Donetsk, 2007, issue 44, pp. 26 – 33.

5. Агеев, В.Г. Низкотемпературная кинетика очагового окисления дисперсных органических веществ / В.Г. Агеев, С.П. Греков, К.В. Глушенко // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2017. – № 1(54). – С. 14 – 26.

Ageyev, V.G., Grekov, S.P., Hlushenko, K.V. *Nizkotemperaturnaya kinetika ochagovogo okisleniya dispersnykh organicheskikh veshchestv* [The low-temperature kinetics of the seat oxidation of disperse organic substances]. *Nauchnyy vestnik NIIGD “Respirator”: nauch.-tekhn. zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2017, no. 1 (54), pp. 14 – 26.

6. Вогман, Л.П. Температурные поля в насыпи травяной муки / Л.П. Вогман, А.Г. Дегтярев, А.Н. Шульга // Пожарная безопасность промышленных объектов: сб. науч. тр. – М.: ВНИИПО, 1991. – С. 69 – 74.

Vogman, L.P., Degtyaryev, A.G., Shul'ga, A.N. *Temperaturnyye polya v nasypi travyanoy muki* [Temperature fields in the embankment of the grass meal]. *Pozharnaya bezopasnost' promyshlennykh obyektov: zb.nauch. tr.* [Fire safety of industrial objects: scientific bulletin]. Moscow, VNIPO Publ., 1991, pp. 69 – 74.

7. Старикова, И.Г. Определение коэффициентов теплоотдачи от угля в окружающие среды / И.Г. Старикова // XXIII Международная научно-практическая школа им. акад. С.А. Христиановича «Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках». – Алушта, 2013. – С. 360 – 361.

Starikova, I.G. *Opredeleniye koefitsiyentov teplootdachi ot uglya v okruzhayushchiye sredy* [Determination of heat-transfer coefficients from coal into environments]. *XXIII Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya shkola im. akad. S.A. Khristianovicha “Deformirovaniye i razrusheniye materialov s defektami i dinamicheskiye yavleniya v gornykh porodakh i vyrabotkakh”* [The XIIIth Academician S.A. Khristianovich theoretical and practical school “Deformation and

destruction of materials with defects and dynamical phenomena in strata and mine workings”]. Alushta, 2013, pp. 360 – 361.

8. Греков, С.П. Минимальное безопасное скопление органического материала / С.П. Греков, И.Г. Старикова, В.П. Орликова // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2016. – № 1(53). – С. 23 – 30.

Grekov, S.P., Starikova, I.G., Orlikova, V.P. *Minimal'noye bezopasnoye skopleniye organicheskogo materiala* [The minimum safe accumulation of an organic material]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurnal* [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: scientific-technical journal]. Donetsk, 2016, no. 1(53), pp. 23 – 30.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Д.Ю. Палеевым.
Дата поступления рукописи 24.10.2016

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: obep.niigd@list.ru;

Irina Gennadyevna Starikova, Cand. Sci. (Tech.), academic secretary; e-mail: ir-starik@yandex.ru;

Kristina Valeryevna Hlushenko, engineer of the 1st category; 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) 311-13-52; (+38 062) 311-69-51

CALCULATION OF HEAT-TRANSFER COEFFICIENTS IN THE LAYER OF A GRANULAR SUBSTANCE

Purpose. Improvement of the method of determination of the heat-transfer coefficients in disperse mediums on the basis of the theoretical description of the seat self-heating process of substances and experimental data.

The methods are grounded on the mathematical model of the seat self-heating of the organic disperse substances at the expense of chemical oxidation reactions and literature data.

Results. It is shown that the cases of the seat spontaneous combustion resulting in the fire take place by the storage of disperse organic substances in confined spaces. The heat transfer within the disperse medium is realized by means of thermal conductivity with the heat-transfer coefficient that is characteristic for the substance given. The use of the mathematical model of the seat self-heating of the disperse substance worked out before is proposed, and together with the experimental data available the heat-transfer coefficients are determined by means of the modeling of the process. The method of calculation of the heat-transfer coefficients is shown by way of example of the literature data on the self-heating in the grass meal accumulation. The results received are agreed satisfactorily with the data of V.N. Timofeyev, T. Sherwood, B.D. Kantselson, P.G. Romankov.

Scientific novelty. The method of determination of the heat-transfer coefficients is proposed that differs from the existing methods by that fact that the process of the really developing seat self-heating of the disperse substance is simulated by means of the mathematical model proposed and taking into account the thermal characteristics of the substance determined under laboratory conditions.

Practical value. The data obtained are used by determination of the permissible dimension of the disperse organic substance excluding its spontaneous combustion.

Keywords: *spontaneous combustion; heat transfer; Bio and Fourier criteria; incubation period; organic substance.*

УДК 628.541:546.3

Сергей Павлович Высоцкий, д-р техн. наук, завкафедрой; e-mail: kafedraekologii@yandex.ru;
тел. +38 050 649-84-36;

Дарья Игоревна Ермакова, бакалавр; e-mail: kf-ebg@adidonntu.ru; тел. +38 099 791-90-39
Автомобильно-дорожный институт Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Донецкий национальный технический университет»
284646, Горловка, ул. Кирова, 51;

Татьяна Ивановна Степаненко, аспирант; e-mail: tatyana_stepanenko@list.ru
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»
286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. +38 050 216-18-94

ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ

Цель. Выбор оптимальных направлений нейтрализации вредного воздействия токсических компонентов в сточных водах за счет их очистки от тяжелых металлов.

Методика основана на анализе физико-химических процессов очистки сточных вод от тяжелых металлов с использованием различных технологий.

Результаты. Рассмотрены пути совершенствования технологий очистки сточных вод от тяжелых металлов с использованием извести и высших водных растений.

Научная новизна. Впервые установлены аналитические зависимости концентрации тяжелых металлов от уровня pH раствора, емкости поглощения, скорости сорбции меди и свинца высшими водными растениями.

Практическая значимость. Полученные аналитические зависимости дают возможность выбрать оптимальные условия очистки сточных вод с использованием реагентных и биологических методов.

Ключевые слова: *тяжелые металлы; очистка; реагенты; производство растворимости; биоплато; емкость поглощения; время сорбции.*

Состояние проблемы. Загрязнение поверхностных и подземных вод тяжелыми металлами создает неблагоприятную экологическую ситуацию не только в техносферных, но и в отдаленных регионах, расположенных на значительных расстояниях от промышленных предприятий. Имели место случаи, когда неорганизованные поступления загрязнителей в подземные воды в г. Черкассы вызывали ухудшение качества питьевой воды в колодцах Полтавской обл. Это приводило к массовым случаям ухудшения состояния здоровья сельских жителей.

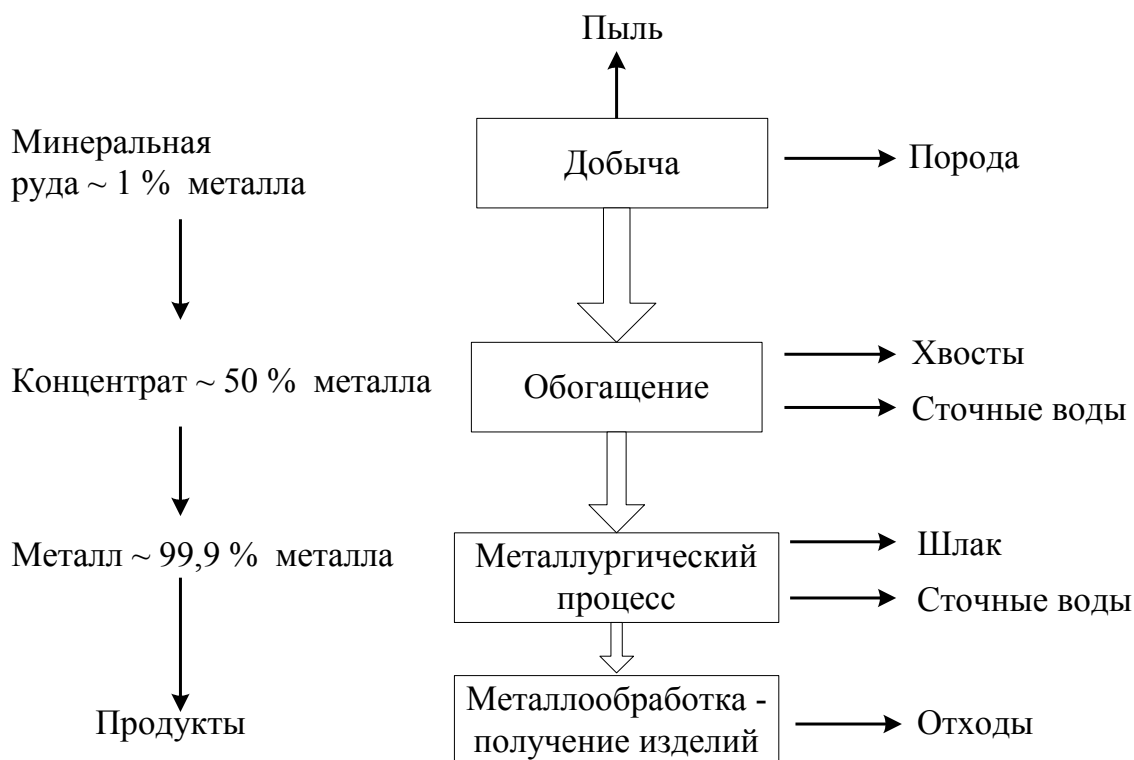
Одним из распространенных загрязнителей являются соединения тяжелых металлов. Термин «тяжелые металлы» относят к более 40 химическим элементам периодической системы, атомная масса которых превышает 50 а.е.м. В некоторых случаях такой термин применяют к элементам, плотность которых более 7 кг/дм³ (за исключением благородных и редких металлов). Многие из тяжелых металлов входят в перечень микроэлементов, которые активно участвуют в биологических процессах. В этих биологических системах

микроэлементы играют роль катализаторов или ингибиторов процессов жизнедеятельности.

Общепринято утверждение, что нет токсических веществ, а есть токсические концентрации. Это отметил пять веков назад Ф. Парацельс (Ф. Гугенгейм), который говорил, что в малых дозах полезно – в больших ядовито [1]. Учитывая указанные соображения, при наличии сбросов сточных вод, загрязненных соединениями тяжелых металлов, применяют методы их нейтрализации, удаления указанных соединений до приемлемых уровней.

Функционирование многих отраслей промышленности сопряжено с поступлением в окружающую среду различных видов загрязнений, в том числе тяжелых металлов. Наиболее обширными источниками эмиссии загрязнений являются горно-добывающая и металлургическая отрасли промышленности (черная и цветная металлургия), а также тепловая энергетика. Последние две отрасли являются также самыми крупными потребителями водных ресурсов и их загрязнителями.

Путь поступления отходов в окружающую среду при переработке руд можно проследить по следующей схеме.



Огромные массы топлива после сжигания превращаются в золу и шлак, которые концентрируют в себе большую массу токсических компонентов. Последние поступают в золоотвалы-накопители, откуда токсические компоненты выщелачиваются и загрязняют поверхностные и подземные воды.

Анализ последних исследований. В англо- и русскоязычных публикациях уделяется большое внимание вопросам токсического действия

тяжелых металлов на живые организмы и методам его нейтрализации. В работах [2 – 4] приведены данные об источниках поступления тяжелых металлов и характеристика токсических воздействий. Растворимость отдельных тяжелых металлов в водных растворах и степень их удаления с использованием щелочных агентов и сульфидов натрия приведена в рекомендациях агентства по охране окружающей среды Соединенных Штатов Америки [5]. Показано, что области оптимальных значений pH для осаждения отдельных металлов существенно отличаются. В работе [4] показано, что кривые остаточной концентрации тяжелых металлов имеют V-образную форму. Это обусловлено амфотерными свойствами металлов. В зависимости от точности применяемых методов контроля металлов минимальные остаточные концентрации, а также значения pH существенно отличаются в различных литературных источниках. В работе [6] сделана попытка аналитического описания процесса осаждения в зависимости от уровня pH раствора. Из работ [3, 7] следует, что целесообразно ступенчатое осаждение металлов для снижения их остаточной концентрации. Учитывая то, что при химическом осаждении металлов имеет место вторичное загрязнение воды, большое внимание уделяют применению биохимических методов очистки, а также использованию высших водных растений [8, 9].

Цель исследования – выбор путей нейтрализации вредного воздействия токсических компонентов за счет очистки сточных вод от тяжелых металлов.

Изложение основного материала исследований. В мировой практике используют значительное количество методов очистки сточных вод от соединений тяжелых металлов. При выборе технологического процесса очистки сточных вод и реагента для осаждения тяжелых металлов следует учитывать следующее:

1. При использовании реагента необходимо обеспечивать по возможности самую низкую остаточную концентрацию осажденного металла в растворе, т.е. произведение растворимости (ПР) ионов, составляющих осадок, должно быть минимальным.

2. Так как оптимальные значения pH для различных металлов существенно отличаются, в технологии осаждения тяжелых металлов необходимо предусматривать несколько ступеней осаждения и, при высоких требованиях к качеству осветленной воды, предусматривать использование двух реагентов. На первых ступенях очистки используют реагент, который обеспечивает более высокое ПР (например, NaOH, Na₂CO₃, CaO), на второй ступени используют более дорогой реагент, который обеспечивает более низкое значение ПР (например, Na₂S).

3. При выборе реагента-осадителя учитывают приоритетные возможности использования полученных в результате осаждения продуктов.

4. Стоимость реагента-осадителя должна учитываться в расчете на стоимость активного вещества, т.е. рубль на моль.

5. С точки зрения обеспечения необходимой производительности технологического процесса предусматривают применение дополнительных

реагентов типа затравочных кристаллов, коагулянтов и флокулянтов [10].

6. При выборе технологии обработки сточных вод необходимо отдавать предпочтение повторному использованию очищенной воды.

7. При аппаратурном оформлении для повышения эффективности процесса очистки необходимо приближение режима работы реакторов к идеальному вытеснению (например, за счет использования тонкослойных элементов в отстойниках).

8. При обработке потоков сточных вод с различными, существенно отличающимися концентрациями соединений тяжелых металлов предпочтительно обрабатывать их отдельно. Это позволяет повысить производительность установок переработки сточных вод, уменьшить концентрацию тяжелых металлов в сточных водах и обеспечить большую степень рециркуляции очищенной воды.

При использовании для осаждения тяжелых металлов одного из наиболее дешевых реагентов – негашеной извести цена реагента в РФ в зависимости от поставщика существенно изменяется от 2194 (Оренбург) до 3850 руб./т (Уфа), средняя стоимость 1 моль извести равна 169,2 руб./кмоль. Осаждение сульфидом натрия может быть реализовано с использованием реагентов, поставляемых из КНР по стоимости 50 руб./кг или Екатеринбурга – по 58 руб./кг. Средняя стоимость реагента 2,106 руб./моль. Осаждение 1 моль металла сульфидом натрия в 25 раз дороже осаждения известью.

Несмотря на значительное увеличение затрат применение сульфида натрия обеспечивает следующие преимущества. ПР сульфидов большинства тяжелых металлов на много порядков ниже ПР гидроксидов, что позволяет осуществлять более полное осаждение загрязнителей. Например, по Cu^{2+} , Cd^{2+} , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Fe^{2+} , Ni^{2+} соотношение ПР гидроксидов и сульфидов равно соответственно $1,75 \cdot 10^{18}$; $6,6 \cdot 10^{15}$; $2,35 \cdot 10^{15}$; $1,26 \cdot 10^8$; $6,21 \cdot 10^5$ и $4,21 \cdot 10^5$. Растворимость сульфидов металлов относительно мало изменяется при увеличении значения рН. В то же время равновесная концентрация большинства гидроксидов тяжелых металлов при увеличении значения рН существенно возрастает.

Из приведенного выше ряда тяжелых металлов отличительными свойствами обладают Cr^{3+} и Fe^{3+} . Гидроксиды последних имеют весьма низкие значения ПР, соответственно $5,4 \cdot 10^{-31}$ и $1,1 \cdot 10^{-36}$. Поэтому растворы, загрязненные соединениями указанных металлов, целесообразно обрабатывать раствором извести в восстановительной среде для хрома Cr^{3+} и окислительной для железа Fe^{3+} .

Диапазон оптимальных значений рН для осаждения тяжелых металлов существенно отличается (рис. 1). Поэтому возникает необходимость использования ступенчатого осаждения. Целесообразность такого решения имеет место также при использовании вначале осаждения тяжелых металлов раствором извести, а затем сульфидом натрия. Это позволяет существенно увеличить степень удаления тяжелых металлов из сточных вод.



Рис. 1. Диапазоны pH для осаждения тяжелых металлов с использованием едкого натра NaOH [7]

При обработке данных агентства по окружающей среде США [5], а также данных, приведенных в работе [6], получены значения растворимости отдельных металлов в зависимости от pH среды и оптимальных значений pH для осаждения, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Аналитические зависимости остаточной концентрации металлов от уровня pH

Элемент	Агентство по охране окружающей среды США [5]	$pH_{\text{Опт}}$	Формула [6]	$pH_{\text{Опт}}$
Cu	$c = \frac{10^{25,84} + 10^{2,9pH}}{10^{1,89pH} \cdot 10^{12,69}}$	pH=8,91	$c = \frac{10^{30,474} + 10^{3,221pH}}{10^{1,869pH} \cdot 10^{17,284}}$	pH=9,42
Zn	$c = \frac{10^{30,34} + 10^{3,3pH}}{10^{2,11pH} \cdot 10^{12,6}}$	pH=9,13	$c = \frac{10^{31,808} + 10^{3,291pH}}{10^{1,817pH} \cdot 10^{17,36}}$	pH=9,62
Ni	$c = \frac{10^{36,85} + 10^{3,64pH}}{10^{2,32pH} \cdot 10^{16,82}}$	pH=10,13	—	—
Fe ⁺⁺⁺	—	—	$c = \frac{10^{19,848} + 10^{2,557pH}}{10^{1,6pH} \cdot 10^{14,248}}$	pH=7,79
Al	—	—	$c = \frac{10^{25,788} + 10^{3,535pH}}{10^{2,479pH} \cdot 10^{14,228}}$	pH=7,3

Вследствие несложных преобразований получаем значения концентрации для активности соответствующих ионов (табл. 2).

Таблица 2

Активность ионов

Элемент	Агентство по охране окружающей среды США [5]	Формула [6]
Cu	$c = \frac{10^{25,842} + a_n^{2,903}}{10^{12,692} a_n^{1,015}}$	$c = \frac{10^{30,474} + a_n^{3,221}}{10^{17,284} a_n^{1,352}}$
Zn	$c = \frac{10^{30,34} + a_n^{3,33}}{10^{12,596} a_n^{1,222}}$	$c = \frac{10^{31,808} + a_n^{3,291}}{10^{17,36} a_n^{1,474}}$
Ni	$c = \frac{10^{36,853} + a_n^{3,64}}{10^{16,821} a_n^{1,318}}$	–
Fe ⁺⁺⁺	–	$c = \frac{10^{19,848} + a_n^{2,557}}{10^{14,248} a_n^{0,957}}$
Al	–	$c = \frac{10^{25,788} + a_n^{3,535}}{10^{14,228} a_n^{1,056}}$

В мировой практике и на предприятиях стран СНГ для очистки сточных вод от соединений металлов широко используют биоплато. Такие металлы, как алюминий, железо, барий, кадмий, медь, кобальт, хром, марганец, свинец, ванадий, цинк, могут накапливаться в растениях. Такие растения, как *A. Azigrea*, *V. Vulgaris*, *C. Fuscatum*, *C. Arvensis* и *C. Dactylon*, накапливают свинец, цинк, медь, кадмий, сурьму и мышьяк в 100 раз лучше, чем другие представители флоры. При выборе растений для биоплато необходимо учитывать их тип и то, что, например, камыш активно аккумулирует марганец, ирис – кальций, осока – железо, а ряска – медь.

Водные растения выполняют следующие функции: фильтрационную (осаждение взвешенных веществ); сорбционную (поглощение биогенных элементов и некоторых органических веществ); концентрационную (способность концентрировать в биомассе растений некоторые металлы и органические вещества); окислительную (выделяют кислород при фотосинтезе); детоксикационную (обеззараживают токсические соединения). Эффективность очистки сточных вод в биоплато существенно зависит от вида растений, типа загрязнителей и организации потока загрязненных вод. Предпочтительно осуществлять движение потока, приближенного к типу реакторов идеального вытеснения с выполнением перегородок в картах или последовательным соединением карт. При этом в последовательных картах или по ходу движения потока очищаемой воды целесообразно выращивать различные типы растений, избирательно концентрирующие загрязнения, которые присутствуют в сточных водах.

Как показано в работе [8], процесс сорбции при использовании высушенных водорослей происходит в три стадии. Первая стадия длится примерно 20 мин. Вторая стадия с линейной зависимостью степени сорбции от времени длится от 20 до 120 мин и от 20 до 180 мин соответственно для свинца и меди. Третья стадия сорбции является весьма медленным процессом вследствие низкого градиента концентраций (рис. 2).

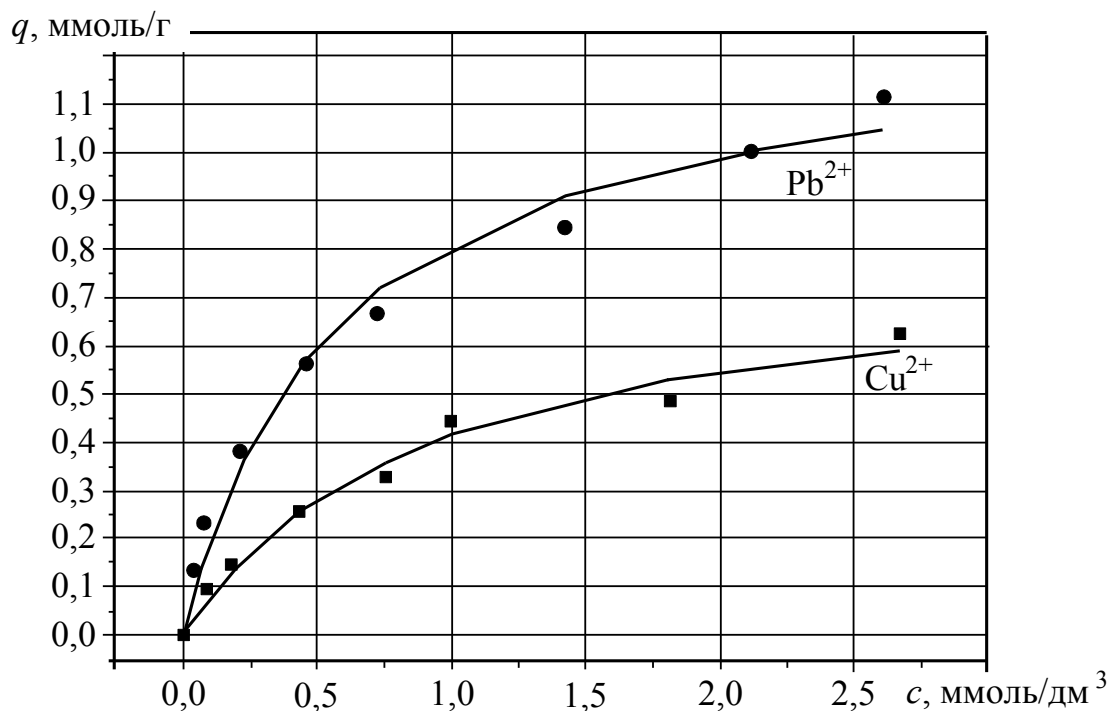


Рис. 2. Зависимость емкости поглощения ионов меди и свинца q от их концентрации c

Обнаружено, что сорбцию свинца и меди описывает при высокой степени корреляции уравнение Ленгмюра:

$$E = \frac{E_{\max}bc}{1+bc},$$

где E – емкость поглощения металла в состоянии равновесия, ммоль/г;

E_{\max} – максимальная емкость поглощения, ммоль/г;

c – равновесная концентрация металла, ммоль/дм³;

b – константа сродства металла к сорбенту, дм³/(г·ммоль).

Обработка приведенных на рис. 2 данных показывает, что максимальная емкость альгината кальция (сорбента из высших водорослей) равна 0,79 и 1,26 ммоль/г, а значение b равно 1,10 и 1,84 дм³/ммоль соответственно для ионов меди и свинца. Сорбент на основе водорослей имеет большую емкость ионов свинца по сравнению с ионами меди.

Выводы

1. Обоснованы приоритетные направления очистки сточных вод от тяжелых металлов с использованием реагентов и высших водных растений. Для повышения степени очистки воды предпочтительно использование комбинации двух или более методов.
2. Получены аналитические зависимости остаточной концентрации железа, никеля, цинка, меди и алюминия от уровня pH обрабатываемой воды.
3. Обоснована необходимость ступенчатой очистки воды от нескольких соединений тяжелых металлов при использовании одного щелочного реагента или последовательной обработке воды щелочным реагентом и сульфидом натрия.
4. При очистке воды в биоплато целесообразна организация последовательных потоков воды с приближением к работе реакторов идеального вытеснения.

Список литературы / References

1. Duruibe, J., Ogwuegbu, M.O.C., Egwurugwu, J.N. Heavy metal pollution and human biotoxic effects. *International Journal of Physical Sciences*, 2007, vol. 2 (5), pp. 112 – 118.
2. Vrijheid, M., Dolk, H., Armstrong, B. Hazard potential ranking of hazardous waste sites and risk of congenital anomalies. *Occupational Environmental Medicine*, 2002, no. 59 (II), pp. 768 – 776.
3. Ayres, D.M., Davis, A.P., Gietka, P.M. Removing heavy metals from wastewater. University of Maryland. Engineering Research Center Report. 1994, August, 21 p.
4. Aube, B., Aubé, E. The science of treating acid mine drainage and smelter effluents. 361 Aumais, Ste-Anne-de-Bellevue. Québec, Canada, H9X 4A9. 2004, 21 p.
5. Corbitt, R.A. Standard handbook of environmental engineering. McGraw-Hill Professional Publ., 1999, 2nd ed., 1216 p. ISBN-10: 0070131600; ISBN-13:978-0070131606.
6. Высоцкий, С.П. Влияние различных факторов на растворимость металлов и степень удаления соединений железа из раствора / С.П. Высоцкий, Т.И. Степаненко // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2016. – № 1(18). – С. 96 – 104.
7. Vysotskiy, S.P., Stepanenko, T.I. *Vliyaniye razlichnykh faktorov na rastvorimost' metallov i stepen' udaleniya soyedineniy zheleza iz rastvora* [Influence of various factors on dissolubility of metals and degree of removal of iron compounds out of the solution]. *Vesti Avtomobil'no-dorozhnogo instituta* [News of the Automobile Engineering Institute]. 2016, no. 1(18), pp. 96 – 104.
7. Rodriguez, J., Schweda, M., Stopic, S., Friedrich, B. Techno-economical comparison of conventional hydroxide precipitation and electrocoagulation for heavy

metal removal from industrial wastewater. *Metall. Forschung*, 2007, vol. 61, no. 3, pp. 24 – 30.

8. Kleinübing, S.J., Costa, F.G., Bertagnolli, C., Carlos, M.G. Heavy metal sorption by calcium alginate beads from sargassum filipendula. School of Chemical Engineering, State University of Campinas, CEP 13081-970, Campinas, SP, Brazil. 6 p.

9. Будиловскис, Ю. Технология глубокой очистки стоков и утилизации отходов / Ю. Будиловскис // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2006. – № 2. – С. 32 – 34.

Budilovskis, Yu. *Tekhnologiya glubokoy ochistki stokov i utilizatsii otkhodov* [Technology of the deep purification of outflows and recycling of wastes]. *Khimicheskoye i neftegazovoye mashinostroyeniye – Chemical and oil and gas mechanical engineering*, 2006, no. 2, pp. 32 – 34.

10. Запольский, А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды / А.К. Запольский, А.А. Баран. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.

Zapol'skiy, A.K., Baran, A.A. *Koagulyanty i flokulyanty v protsessakh ochistki vody* [Coagulants and flocculants in the water abrading processes]. Leningrad, Khimiya Publ., 1987, 208 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.И. Нездойминовым.
Дата поступления рукописи 07.02.2017

Sergey Pavlovich Vysotskiy, Dr. Sci. (Tech.), head of subdepartment; e-mail: kafedraekologii@yandex.ru; phone +38 050 649-84-36;

Darya Igorevna Yermakova, bachelor; e-mail: kf-ebg@adidonntu.ru; phone +38 099 791-90-39
The Automobile Engineering Institute of the State Educational Institution of Higher Occupational Education “The Donetsk National Technical University”
284646, Gorlovka, 51, ulitsa Kirova;

Tatyana Ivanovna Stepanenko, postgraduate student; e-mail: tatyana_stepanenko@list.ru
The State Educational Institution of Higher Occupational Education “The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture”
286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone +38 050 216-18-94

SEWAGE TREATMENT FROM HEAVY METALS

Purpose. Choice of the optimum directions of neutralization of the harmful influence of toxic components in sewage water at the expense of their treatment from heavy metals.

The methods are based on the analysis of physicochemical processes of the sewage treatment from the heavy metals with the use of various technologies.

Results. The ways of improvement of the technologies of the sewage treatment from the heavy metals with the use of lime and higher hydrophyte weeds are considered.

Scientific novelty. The analytical dependences of the concentration of the heavy metals have been ascertained on the pH-level of the solution, adsorptive capacity, sorption rate of copper and lead with the higher hydrophyte weeds at the first time.

Practical value. The analytical dependences received enable to choice the optimum conditions of the sewage treatment with the use of reagent and biological methods.

Keywords: heavy metals; treatment; reagents; product of dissolubility; bioplateau; adsorptive capacity; sorption time.

УДК 622.868.42:622.026.7

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

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

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 311-12-00;

Евгений Васильевич Курбацкий, канд. техн. наук, доц.; e-mail: ota@mine.donntu.org

Донецкий национальный технический университет

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

ПАРАМЕТРЫ БАРЬЕРНОЙ ПЕРЕМЫЧКИ ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ ПОЖАРНЫХ УЧАСТКОВ

Цель. Определение параметров барьерной перемычки.

Методы. Аналитические исследования на основе теории свода обрушения М.М. Протодряконова.

Результаты. Получены основные параметры барьерной перемычки: коэффициент заполнения выработанного пространства обрушенными породами, высота заполнения, условие полного заполнения обрушенными породами кровли.

Научная новизна. Получены выражения для определения основных параметров барьерных перемычек: высоты заполнения выработки обрушенной породой, условия заполнения и коэффициента заполнения.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы при сооружении барьерных перемычек с искусственным обрушением кровли выработки и, в частности, для определения дополнительного объема породы, необходимого для заполнения выработки горными породами.

Ключевые слова: барьерная перемычка; свод обрушения; высота обрушения; коэффициент заполнения; коэффициент разрыхления.

Состояние вопроса. Один из способов изоляции пожарных участков на угольных шахтах – сооружение барьерной перемычки. Барьерная перемычка относится к вспомогательным средствам гашения воздушных ударных волн и применяется совместно с изолирующей перемычкой. Возведение барьерной перемычки осуществляют путем обрушения кровли с помощью буровзрывных работ. Бурение шпуров и их взрывание производят по специально утвержденному паспорту. Согласно работам [1, 2] для более полной подбуртовки всего сечения выработки по ее длине проводят забуривание предварительно заполненных породой шахтных вагонеток. По существу это означает, что объем обрушенной породы недостаточен для перекрытия изолируемой выработки. В работе [1] приведены рекомендации по выбору длины взрывоустойчивой породной перемычки, которая должна быть равна двум площадям сечения выработки, выраженной в метрах. Приведенные рекомендации справедливы для заполненной обрушенными породами выработки. В работах [3, 4] на основании теоретических исследований

локализации взрыва обрушенными породами установлена связь между длиной породной перемычки h_p , м, и определяющими параметрами в виде

$$h_p = k_1 k_2 H P_2,$$

где k_1 – коэффициент заполнения выработанного пространства обрушенными породами;

k_2 – кусковатость обрушенных пород;

H – длина загазованного участка, м;

P_2 – кратность превышения давления во фронте взрывной волны.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, что важен вопрос определения коэффициента заполнения выработанного пространства обрушенными породами при применении стандартной буровой техники во время проведения буровзрывных работ. Поскольку длины буримых шпуров ограничены техническими характеристиками бурильных машин и крепостью пород, а повторное бурение невозможно, то объем обрушенной породы может быть недостаточным для заполнения сечения выработки по всей длине перемычки. В связи с этим актуален вопрос установления условия заполнения выработки обрушенными породами.

Цель работы. Определение основных параметров барьерной перемычки: коэффициента заполнения выработки при буровзрывном обрушении пород кровли, высоты обрушенной породы, условия заполнения сечения выработки.

Результаты исследований. Рассмотрим выработку с шатровым сводом (см. рисунок), выполненным в виде полуокружности. При сооружении барьерной перемычки кровлю выработки обуривают шпурами по всей длине полуокружности. При проведении взрывных работ обрушивается не только часть породного массива выработки, определяемая длиной шпуров, но и некоторый дополнительный объем, определяемый давлением горных пород. В качестве рабочей гипотезы образования свода обрушения принята классическая теория свода профессора М.М. Протодьяконова. Суть ее состоит в том, что породы обрушиваются до образования поверхности неправильного очертания, называемого сводом обрушения, за пределами которого образуется свод естественного равновесия в виде параболы, который воспринимает давление вышележащих пород. Высоту этого свода определяют по формуле М.М. Протодьяконова:

$$v = a / 2f,$$

где v – высота свода обрушения, м;

a – ширина выработки, м;

f – коэффициент крепости по шкале профессора М.М. Протодьяконова.

Для выработки со сроком службы более двух лет $v = a / f$.

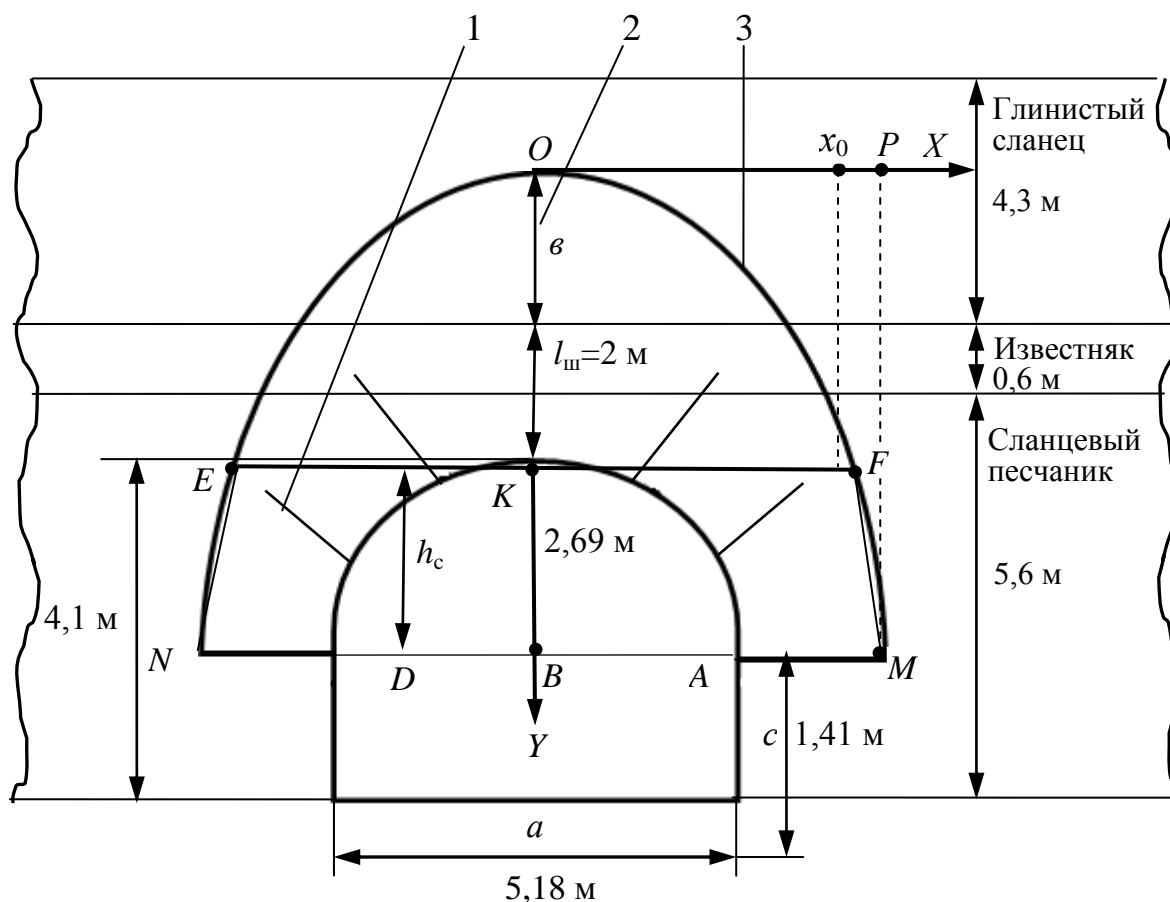


Схема выработки с шатровым сводом:

1 – шпур; 2 – высота свода; 3 – свод обрушения

Для определения объема обрушенной породы необходимо найти точное выражение параболы, которая может быть представлена в виде $y = ex^2$. Для этого начало координат O системы XOY поместим (см. рисунок) в вершину параболы, а ось OY расположим вдоль оси симметрии сечения выработки. Установим координаты крайней точки M ветви параболы. Очевидно, что координата по оси OX равна

$$\frac{a}{2} + l_{\text{ш}},$$

где $l_{\text{ш}}$ – длина шпура, м.

Координата по оси OY равна

$$v + l_{\text{ш}} + R,$$

где R – радиус свода выработки, м.

Тогда коэффициент e параболы определяется выражением

$$e + l_{\text{ш}} + R = e \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right)^2,$$

откуда

$$e = \frac{e + l_{\text{ш}} + R}{\left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right)^2}.$$

Следовательно, уравнение параболы принимает вид

$$y = \frac{e + l_{\text{ш}} + R}{\left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right)^2} x^2.$$

Зная уравнение параболы, можно найти объем обрушенной породы. Для этого необходимо найти площадь фигуры $NEOFMAKD$ (см. рисунок) и умножить на длину перемычки. Площадь фигуры $NEOFMAKD$ находим по формуле

$$S = 2 \left[\left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + e \right) - \frac{\pi R^2}{4} - \int_0^{\frac{a}{2} + l_{\text{ш}}} \frac{e + l_{\text{ш}} + R}{\left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right)^2} x^2 dx \right].$$

После интегрирования и преобразования получаем

$$S = \frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + e \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2}.$$

Объем обрушенной горной массы находим по формуле

$$V = kSL = kL \left[\frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + \varepsilon \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \right],$$

где $k = \sum_{i=1}^n k_i / n$ – средний коэффициент разрыхления обрушенных слоев пород;

k_i – коэффициент разрыхления i -го слоя;

n – количество слоев;

L – длина перемычки, м.

Применение среднего коэффициента разрыхления обусловлено тем, что с одной стороны свод обрушения кровли криволинейный с различной долей участия слоев породы, а с другой стороны – различие в значениях коэффициентов разрыхления незначительны, что говорит об устойчивости среднеарифметического значения. Так, в условиях шахты № 22 «Коммунарская» (11-й восточный конвейерный штрек) породы кровли состоят из слоев песчаного сланца, известняка и глинистого сланца с коэффициентами разрыхления, соответственно равными 1,20; 1,20 и 1,16. Среднее значение коэффициента разрыхления 1,19, а наибольшее расхождение не превышает 2,6 %.

Высоту заполнения выработки обрушенной породой находим как отношение

$$h = \frac{V}{aL} = \frac{k}{a} \left[\frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + \varepsilon \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \right]$$

при условии, что $h \leq c$,

где c – высота вертикальной стенки выработки, м.

Если $h > c$, то обрушенная порода заполняет свод выработки. Высоту h_c заполнения свода породой находим из условия

$$V_c = V - a c L,$$

где V_c – объем породы, заключенный в своде выработки, м³.

Разделим обе части этого уравнения на L и перейдем к рассмотрению соотношений между площадями:

$$S_c = S - ac = k \left[\frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{III} \right) \left(R + l_{III} + \epsilon \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \right] - ac,$$

где S_c – площадь фигуры $NEFM$, м².

Зная уравнение параболы и геометрические размеры выработки можно аналитически определить S_c . Однако такой путь решения – трудоемкий и громоздкий. Поэтому в фигуре $NEFM$ заменим отрезки ветвей параболы NE и FM прямыми, в результате получаем трапецию $NEFM$. Площадь трапеции находим по формуле

$$S_T = \frac{NM + EF}{2} h_c,$$

где S_T – площадь трапеции, м²;

NM и EF – основания трапеции, м;

h_c – высота трапеции, м.

Приравнивая S_T к S_c , получаем уравнение

$$\frac{NM + EF}{2} h_c = k \left[\frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{III} \right) \left(R + l_{III} + \epsilon \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \right] - ac. \quad (1)$$

Согласно рисунку $NM = 2BM = 2(R + l_{III})$; $EF = 2KF$. Отрезок KF находим из решения уравнения параболы

$$\epsilon + l_{III} + R - h_c = \frac{\epsilon + l_{III} + R}{\left(\frac{a}{2} + l_{III} \right)^2} KF^2,$$

откуда

$$KF = \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \sqrt{\frac{R + l_{\text{ш}} + \vartheta - h_c}{\vartheta + l_{\text{ш}} + R}},$$

тогда уравнение (1) запишем как

$$\left[R + l_{\text{ш}} + \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \sqrt{\frac{R + l_{\text{ш}} + \vartheta - h_c}{\vartheta + l_{\text{ш}} + R}} \right] h_c = k \left[\frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + \vartheta \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \right] - ac. \quad (2)$$

Преобразуя уравнение (2) к виду, удобному для решения относительно h_c , получаем

$$h_c^3 - 2\alpha \left(\vartheta + l_{\text{ш}} + R \right) h_c + \alpha^2 \left(\vartheta + l_{\text{ш}} + R \right) = 0,$$

где

$$\alpha = k \left[\frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + \vartheta \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \right] \frac{1}{R + l_{\text{ш}}} - \frac{ac}{R + l_{\text{ш}}}.$$

Полученное трехчленное кубическое уравнение может быть решено аналитически с использованием формул Кардано. Ввиду громоздкости решение уравнения не приводим. Альтернативой может служить компьютерная программа для решения кубического уравнения [5]. По коэффициентам уравнения программа быстро и с высокой точностью определяет его корни. Решением уравнения является только действительный корень.

Таким образом, высота заполнения выработки обрушенной породой в общем случае выражается уравнением

$$h = \begin{cases} \left[\frac{k}{a} \frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + \epsilon \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \right], & \text{если } \frac{k}{a} \frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + \epsilon \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \leq c; \\ \left[\frac{k}{a} \frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + \epsilon \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} \right] + h_c, & \text{если } \frac{k}{a} \frac{4 \left(\frac{a}{2} + l_{\text{ш}} \right) \left(R + l_{\text{ш}} + \epsilon \right)}{3} - \frac{\pi R^2}{2} > c. \end{cases}$$

Коэффициент заполнения выработки обрушенными породами находим по формуле

$$k_1 = \frac{V}{V_1},$$

где V_1 – объем выработки после буровзрывных работ, м^3 .

Очевидно, что

$$V_1 = \frac{V}{k} + S_0 L,$$

где S_0 – площадь начального сечения выработки, м^2 .

Отсюда

$$k_1 = \frac{V}{V/k + S_0 L} = \frac{1}{1/k + \frac{S_0 L}{V}} = \frac{1}{1/k + S_0/S} = \frac{k}{\frac{1}{k} + \frac{S_0}{S}}.$$

Тогда

$$\frac{S_0}{S} = \frac{1}{k_1} - \frac{1}{k}.$$

При заполнении выработки $k_1 = 1$, поэтому получаем

$$\frac{S_0}{S} = 1 - \frac{1}{k}.$$

Из приведенной формулы следует вывод, заключающийся в том, что заполнение выработки обрушенными породами не зависит от абсолютного значения сечения выработки и от ее формы, а зависит от соотношения S_0 и S и среднего коэффициента разрыхления пород кровли.

Имея $k = 1,19$ – среднее значение коэффициента разрыхления пород кровли выработки, легко находим числовое значение отношения $S_0/S = 0,16$. Таким образом, для заполнения горной выработки необходимо, чтобы площадь сечения взорванного и обрушенного свода более чем в 6 раз превышала начальную площадь сечения выработки. Для условий 11-го восточного конвейерного штрека шахты № 22 «Коммунарская» при бурении шпуров длиной $l_{шт} = 2$ м коэффициент заполнения выработанного пространства обрушенной породой (при сечении выработки, равном $S_0 = 19,2 \text{ м}^2$) $k_1 = 0,63$. Отсюда легко определить недостающий объем породы $V_{п}$, м^3 , который необходимо распределять по всей длине сооружаемой перемычки:

$$V_{п} = 0,37 S L = 362,6.$$

Следовательно, локализующие свойства обрушенных пород не могут в полной мере изолировать аварийный участок без дополнительного объема породы и погрузочной техники, что усложняет и повышает стоимость сооружения взрывоустойчивой породной перемычки, увеличивает время ее сооружения.

При расположении подготовительной выработки в выработанном пространстве очистного забоя или на границе с ним в кровле формируется зона беспорядочного обрушения [6]. При проведении буровзрывных работ происходит обрушение кровли до самоподбучивания, при котором процесс обрушения прекращается. Очевидно, в таком случае коэффициент заполнения выработанного пространства равен 1. Высоту зоны обрушения находим по формуле [6]

$$h_{\sigma} = \frac{\left(m + \sum_{i=1}^n h_i \right) k p^{(n+1)} - \sum_{i=1}^n h_i k p^i}{k p^{(n+1)} - 1},$$

где h_{σ} – высота зоны обрушения, м;

m – вынимаемая мощность пласта, м;

$h_i k_{p,i}$ – соответственно мощность и коэффициент разрыхления i -го слоя пород.

Расчет высоты зоны обрушения для условий шахты № 22 «Коммунарская» проведен на компьютере с использованием программы Excel.

В результате получены расчетные значения высоты обрушения 26,7 м и длины обрушения 38,04 м.

Выводы. Получены выражения для определения основных параметров барьерных перемычек:

- высоты заполнения выработки обрушенной породой;
- условия заполнения сечения выработки обрушенной породой;
- коэффициента заполнения выработки обрушенной породой;
- дополнительного объема породы для заполнения сечения перемычки.

Показано, что в условиях 11-го восточного конвейерного штрека шахты № 22 «Коммунарская» коэффициент заполнения выработки обрушенной породой равен 0,63, поэтому для заполнения сечения необходим дополнительный объем породы около 362,6 м³, который должен быть распределен по всей длине перемычки до проведения взрывных работ.

Список литературы / References

1. Смоланов, С.Н. Изоляционные, вентиляционные и взрывоустойчивые перемычки / С.Н. Смоланов, В.И. Голинько, М.С. Мартиненко. – Днепропетровск: Наука и образование, 2002. – 260 с.

Smolanov, S.N., Golin'ko, V.I., Martinenko, M.S. *Isolyatsionnyye, ventilyatsionnyye i vzryvoustoychivyye peremychki* [Isolation, ventilation and explosion-proof stoppings]. Dnepropetrovsk, Nauka i obrazovaniye Publ., 2002, 260 p.

2. Агеев, В.Г. Взрывозащита при изоляции пожаров в угольных шахтах / В.Г. Агеев. – Донецк: Арпи, 2014. – 337 с.

Ageyev, V.G. *Vzryvozashchita pri izolyatsii pozharov v ugol'nykh shakhtakh* [Explosion protection by isolation of fires in coal mines]. Donetsk, Arpi Publ., 2014, 337 p.

3. Грядущий, Б.А. Локализация взрывов метановоздушных смесей обрушенными горными породами / Б.А. Грядущий, Ю.Ф. Булгаков // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2000. – С. 81 – 86.

Gryadushchiy, B.A., Bulgakov, Yu.F. *Lokalizatsiya vzryvov metanovozdushnykh smesey obrushennymi gornymi porodami* [Localization of methane-air mixture explosions with mine rocks caved]. *Gornospasatel'noye delo, sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2000, pp. 81 – 86.

4. Булгаков, Ю.Ф. Исследование механизма локализации взрывов метановоздушных смесей в выработанном пространстве лав обрушенными горными породами [Электронный ресурс]. URL: [http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-mehanizma-lokalizatsii-vzryvov-vozduhnyh-smesey-v-vyrabotannom-prostransthe-lav-obrushennymi-gornymi-porodami](http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-mehanizma-lokalizatsii-vzryvov-vozduhnyh-smesey-v-vyrabotannom-prostranstve-lav-obrushennymi-gornymi-porodami) (дата обращения: 31.01.2017).

Bulgakov, Yu.F. *Issledovaniye mekhanizma lokalizatsii vzryvov metano-vozdushnykh smesey v vyrabotannom prostranstve lav obrushennymi gornymi porodami* [Investigation of the mechanism of localization of the methane-air mixtures explosions in the waste of longwall faces with mine rocks caved] [Electronic resource]. Available at: <http://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-mekhanizma-lokalizatsii-vzryvov-vozduhnyh-smesey-v-vyrabotannom-prostranstve-lav-obrushennymi-gornymi-porodami> (accessed 31.01.2017).

5. Решение кубического уравнения [Электронный ресурс]. URL: <http://allcalc.xu/node/62/> (дата обращения: 31.01.2017).

Resheniye kubicheskogo uravneniya [Solving the cubic equation] [Electronic resource]. Available at: <http://allcalc.xu/node/62/> (accessed 31.01.2017).

6. Южанин, И.А. К вопросу определения высоты зоны обрушения пород / И.А. Южанин, А.М. Терлецкий // Наукові праці УкрНДМІ НАН України. – 2008. – № 3. – С. 122 – 127.

Yuzhanin, I.A., Terletskiy, A.M. *K voprosu opredeleniya vysoty zony obrusheniya porod* [To the question of determination of the height of the zone of caving the rocks]. *Naukovi pratsi UkrNDMI NAN Ukrainy* [Scientific studies of the UkrNDMI of the National Academy of Sciences of the Ukraine]. 2008, no. 3, pp. 122 – 127.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым.
Дата поступления рукописи 02.02.2017

Georgy Ivanovich Pefitbay, head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;

Nikolay Aleksandrovich Galukhin, engineer of the 1st category; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru

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

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 311-12-00;

Yevgeny Vasilyevich Kurbatskiy, Cand. Sci. (Tech.), associate professor; e-mail: ota@mine.donntu.org

The Donetsk State Technical University

283001, Donetsk, 58, ulitsa Artyoma. Phone (+38 062) 301-03-09

PARAMETERS OF A BARRIER STOPPING FOR ISOLATION OF FIRE DISTRICTS

Purpose. Determination of parameters of the barrier stopping.

Methods. Analytical investigations on the basis of the M.M. Protodyakonov arch failure theory.

Results. The principal parameters of the barrier stopping, i.e. coefficient of filling the waste with the rocks caved, height of filling, condition of the total filling with the roof rocks caved, are obtained.

Scientific novelty. The expressions to determine the principal parameters of the barrier stoppings, i.e. height of filling of the mine working with the caved rock, conditions of filling and fill factor, are received.

Practical value. The results obtained can be used by erection of the barrier stoppings with the artificial fall of the mine working roof and, in particular, for determination of the additional rock volume that is necessary for filling the mine working with the mine rocks.

Keywords: barrier stopping; arch of failure; height of failure; fill factor; loosening coefficient.

III. Охрана труда

УДК 669.48:544.642

*Александр Иванович Сердюк, д-р хим. наук, проф.; e-mail: ecoalserdiuk@rambler.ru;
Маргарита Маратовна Ялалова, преподаватель-стажер; e-mail: yalalova-rita@mail.ru
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»
286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. (+38 0623) 22-74-71*

БЕЗОПАСНОСТЬ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ КРЕМНЕФТОРИСТОВОДОРОДНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА ДЛЯ СВИНЦЕВАНИЯ

Цель. Определение количественных параметров выбросов свинца и фторидов в атмосферу как особо токсичных, а также выбор методов очистки атмосферного воздуха от свинецсодержащих веществ.

Методика. Экспериментальные исследования основаны на определении выбросов свинца и фторидов с поверхности электролита.

Результаты. Анализ полученных данных показывает, что по суммарному количеству выбросов электролиты в разной степени токсичны при сохранении одинаково хороших эксплуатационных характеристик.

Научная новизна. Впервые определены количественные характеристики выбросов свинца и фторидов в воздух рабочей зоны с поверхности кремнефтористоводородного электролита для свинцевания.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований могут быть использованы для разработки менее токсичных электролитов для свинцевания при сохранении высоких эксплуатационных качеств.

Ключевые слова: промышленная безопасность; свинцевание; кремнефтористоводородный электролит; выбросы; соединения свинца; фториды.

Постановка проблемы. Одной из ведущих отраслей промышленности во многих странах является электрохимическая, в частности электрохимическое свинцевание металлических изделий для защиты их от сернокислотной коррозии. Свинец и его неорганические соединения относятся к I классу опасных веществ и считаются сильнейшим ядом, который включен в списки приоритетных загрязнителей рядом международных организаций (ВОЗ, ЮНЕП, CDC), поэтому превышение их концентраций более предельно допустимой в рабочей зоне ($ПДК_{р,зPb} = 0,05 \text{ мг/м}^3$) неприемлемо. Со стремительным ростом промышленности процесс загрязнения окружающей среды тяжелыми металлами (в частности, соединениями свинца), концентрированными электролитами на основе свинца и другими вредными химическими соединениями, очевиден. Следовательно, существует проблема очистки атмосферного воздуха от токсичных выделений при эксплуатации различных электролитов для свинцевания.

Анализ последних исследований. При свинцевании наиболее часто используют электролиты на основе кремнефтористоводородной и борфтористоводородной кислот [1].

Кремнефтористоводородный электролит свинцевания дешевле борфтористоводородного электролита, проще в приготовлении, может работать при значительном изменении концентрации свинца в электролите [1]. Кроме того, кремнефтористоводородная кислота является отходом при получении суперфосфата, и ее нужно утилизировать.

Электролиты на основе кремнефтористоводородной кислоты были предложены в 1904 г. и применяют их до сих пор на большинстве действующих предприятий [2]. Недостатком является то, что кремнефтористоводородная кислота частично разлагается с выделением токсичного и коррозионно-активного фтористого водорода.

Большинство электролитов на основе кремнефтористоводородной кислоты ядовиты, их пары отравляют воздух рабочей зоны. Некоторые исследователи, изучавшие процессы свинцевания в кремнефтористоводородных электролитах, установили, что выделение вредных веществ с поверхности электролита в процессе электролиза обусловлено его испарением, а также распадом кремнефтористоводородной кислоты, а не электрохимическими процессами [2].

Кроме того, особое внимание уделяется проблемам очистки атмосферы от ряда токсичных соединений. Описание качественных и количественных характеристик токсичных выбросов с поверхности электролитов на основе кремнефтористоводородной кислоты в литературе не найдено. В результате анализа литературных данных представляют интерес составы электролитов по исходным компонентам и режимы их работы (табл. 1).

Таблица 1

Соотношение компонентов кремнефтористоводородных электролитов для свинцевания и режимы работы электролиза

Компоненты и режимы работы	Состав электролитов, г/л	
	№ 1	№ 2
Свинец кремнефтористоводородный (по свинцу)	270	90...250
Кислота кремнефтористоводородная (по фтору)	40	15...70
Кислота борная	5...10	5...10
Желатина	0,1...0,5	0,5...1,0
Температура, °С	25	18...40
Плотность тока, А/м ²	100	100...200
Скорость осаждения, мкм/мин	0,5...2,5	...
Ссылки на источник описания	[3]	[1]

Исходя из составов электролитов в воздухе рабочей зоны могут присутствовать соединения свинца и фториды, составляющие I и II классы опасности соответственно. Присутствующие в составе электролитов борная кислота и желатина в воздухе имеют IV класс опасности и относятся к малоопасным веществам.

Цель работы – количественное изучение выбросов соединений свинца и фторидов с зеркала электролитов в зависимости от их составов.

Материалы исследования. Для определения фторидов с зеркала электролита проводили анализ с использованием ализаринкомплексона и лантана. Концентрация фторидов в выбросах определялась фотоколориметрическим методом на приборе КФК-2. Чувствительность метода 0,1 мг/л. Суммарная погрешность измерения не превышает $\pm 5\%$.

Определение выбросов свинца с поверхности электролита основано на взаимодействии иона свинца с сульфарсазеном с образованием комплексного соединения, окрашенного в желто-оранжевый цвет.

Удельное количество выбросов фторидов и свинца определяли с поверхности электролита № 1, состав и режим работы которого приведены в табл. 1. Результаты расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Удельные выбросы фторидов и свинца с зеркала электролита для свинцевания № 1

Состав выбросов	Удельный выброс $V_{уд}$, мг/(с·м ²)
Фториды	15,2
$V_{удF}/C_F$	0,38
Свинец	2,75
$V_{удPb}/C_{Pb} \cdot 10^3$	10,2
Сумма токсичных выбросов	18,0
Массовая доля свинца в выбросах, %	15,3
Доля свинца в выбросах с учетом ПДК _{р.з} , %	26,5

Из анализа результатов, представленных выше, видно, что сумма токсичных выбросов равна 18 мг/(с·м²), а массовая доля свинца в выбросах 15,3 %, с учетом ПДК_{р.з} 26,5 %.

Рассчитали удельные выбросы фторидов $V_{удF}$ и свинца $V_{удPb}$ с зеркала электролита № 2 при минимальной и максимальной концентрациях C_F кислоты кремнефтористоводородной (по фтору) и свинца C_{Pb} кремнефтористоводородного (по свинцу).

Из данных, представленных в табл. 3, видно, что сумма токсичных выбросов равна 6,7...27,7 мг/(с·м²), массовая доля свинца в выбросах 9,2...14,2 %, а доля свинца в выбросах с учетом ПДК_{р.з} 16,9...24,8 %.

Таблица 3

Удельные выбросы фторидов и свинца с зеркала электролита
для свинцевания № 2

Состав выбросов	Удельный выброс $V_{уд}$, мг/(с·м ²)
Фториды	5,7...25,1
$V_{удF}/C_F$	0,38...0,36
Свинец	0,95...2,55
$V_{удPb}/C_{Pb} \cdot 10^3$	10,6...10,2
Сумма токсичных выбросов	6,7...27,7
Массовая доля свинца в выбросах, %	14,2...9,2
Доля свинца в выбросах с учетом ПДК _{р,з} , %	24,8...16,9

Анализируя данные табл. 2 и 3, можно сказать, что по суммарному количеству выбросов электролит № 2 в среднем в 1,5 раза более токсичен электролита № 1 при сохранении одинаково хороших эксплуатационных характеристик.

Представляет интерес рассмотрение отношения количества удельных выбросов фторидов к концентрации кремнефтористоводородной кислоты $V_{удF}/C_F$ и удельных выбросов свинца к концентрации свинца кремнефтористоводородного $V_{удPb}/C_{Pb}$. Соотношение $V_{удPb}/C_{Pb}$ мало меняется от состава электролита и равно $1,02 \cdot 10^{-2}$, что дает основание считать, что на выбросы свинца влияет только концентрация в электролите свинца кремнефтористоводородного. Соотношение $V_{удF}/C_F$, равное 0,36...0,38, показывает, что выброс фторидов в основном определяется концентрацией кремнефтористоводородной кислоты.

Можно предположить, что унос твердого вещества – свинца кремнефтористоводородного с поверхности электролита осуществляется газообразными продуктами испарения и разложения кремнефтористоводородной кислоты по типу «перегонки с паром» для высококипящих органических веществ. Тем более доля свинца в выбросах невелика и составляет 9...15 %.

Представляет интерес разработка мероприятий по уменьшению доли в выбросах соединений свинца как загрязняющих атмосферу веществ I класса опасности. Согласно требованиям охраны окружающей среды газы, которые могут содержать токсичные компоненты, перед выбросом в атмосферу должны быть подвергнуты очистке. В настоящее время очистка газов от загрязнений является пока единственным эффективным методом обезвреживания газоздушных выбросов.

На практике обычно применяют два способа очистки от свинца [4]: в электрофильтрах и рукавных фильтрах. Мокрые способы очистки

нежелательны вследствие возможности интенсивной коррозии оборудования, связанной с образованием кремнефтористоводородной кислоты в данном случае.

Впервые в Казахстане для технологической плавки свинцовых концентратов применен процесс ISASMELT на Усть-Каменогорском свинцово-цинковом комбинате, строительство которого закончилось в 2012 г. Ожидаемый экологический эффект от реконструкции отделения пылеулавливания – снижение выбросов пыли в атмосферу на 271,2 т в год, в том числе свинца – на 8,5 т в год [5].

Промышленные угольные адсорбирующие фильтры T-Carb (Украина) [6] предназначены для очистки от паров свинца, ртути, паров и запахов растворителей. Эти фильтры также можно использовать в системах вентиляции и кондиционирования для очистки атмосферы. Угольный фильтр имеет специальную структуру и большую площадь фильтрующей поверхности для эффективной адсорбции запахов, которые загрязняют воздух. Очищаемый объем воздуха 3400 м³/ч. Эффективность очистки составляет 99,5 %.

Широкое распространение для тонкой очистки газов рукавных фильтров обусловлено надежностью их работы при обеспечении высокой степени улавливания пыли, простотой обслуживания, высокой степенью автоматизации управления работой. Рукавные фильтры типа ФРКИ [4] предназначены для высокоэффективной очистки (степень очистки 99 %) при температуре от 60 до 130 °С запыленных газов, не являющихся токсичными, агрессивными, пожаро- и взрывоопасными.

Рукавные фильтры типа РФОСП, РФС-И, РФС-1580 [4] разработаны для улавливания выбросов свинца и других тяжелых металлов на предприятиях цветной металлургии при концентрации загрязнителей на входе 500...1000 мг/м³. Конечные концентрации находятся в пределах нескольких миллиграммов на кубический метр. Степень очистки таких фильтров 99,5 %.

В последнее время применяют фильтры серии FMP и RMPF [7], предназначенные для очистки воздуха от аэрозолей, образующихся в процессах сварки, газовой, плазменной и лазерной резки металлов (цинк, свинец, металлическая пыль) и обладающие преимуществами: эффективность очистки – не менее 99 %; высокая производительность по очищаемому газовому потоку (до 20 тыс. м³/ч), низкое аэродинамическое сопротивление газовому потоку (до 200 Па), низкие эксплуатационные энергозатраты (0,27 кВт·ч/м³), удобная конструкция, длительный срок службы.

В данном случае свинец кремнефтористоводородный в выбросах будет находиться в виде аэрозолей и для очистки от них, по-видимому, более всего подойдет вышеописанный способ [7], имеющий малые эксплуатационные энергозатраты, высокую производительность и эффективность очистки, а также длительный срок службы.

После достижения максимально возможной или экономически целесообразной очистки выбросов далее снижают концентрацию вредных примесей, рассеивая их в атмосфере.

Выводы. За счет изменения состава электролита его токсичность понижена в 1,5 раза, а дальнейшая очистка позволяет уменьшить выбросы вредных веществ в несколько раз.

Список литературы / References

1. Сироткин, В.И. Извлечение ионов кадмия из раствора снятия кадмиевых покрытий и промывных вод / В.И. Сироткин, К.В. Казакова, С.С. Кругликов // Гальванотехника и обработка поверхности. – 2005. – Т. XIII, № 3. – С. 33 – 38.

Sirotkin, V.I., Kazakova, K.V., Kruglikov, S.S. *Izvlecheniye ionov kadmiya iz rastvora snyatiya kadmiyevykh pokrytiy i promyvnykh vod* [Extraction of the cadmium ions from the cadmium decoatings solution and scourage]. *Gal'vanotekhnika i obrabotka poverkhnosti – Electroplating and surface treatment*. Moscow, 2005, vol. XIII, no. 3, pp. 33 – 38.

2. Bard, A.J., Faulkner, L.R. *Electrochemical methods. Fundamentals and applications*. 2nd ed. New York, John Wiley & Sons, Inc. Publ., 2001, 850 p. ISBN 0-471-04372-9.

3. Морачевский, А.Г. Применение электрохимических методов в технологии производства вторичного свинца / А.Г. Морачевский, З.И. Вайсгант // Журн. прикладной химии. – 1993. – Т. 66, вып. 1. – С. 3 – 13.

Morachevskiy, A.G., Vaysgant, Z.I. *Primeneniye elektrokhimicheskikh metodov v tekhnologii proizvodstva vtorichnogo svintsa* [Use of electrochemical methods in the technology of the secondary lead production]. *Zhurnal prikladnoy khimii – Journal of the Applied Chemistry*, 1993, vol. 66, issue 1, pp. 3 – 13.

4. Ветошкин, А.Г. Процессы и аппараты газоочистки: учебное пособие. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2005. – 210 с.

Vetoshkin, A.G. *Protsessy i apparaty gazoochistki* [Gas purification processes and apparatus]. Penza, PGU Publ., 2005, 210 p.

5. Errington, W.J., Arthur, P.S., Fountain, C.R. “ISASMELT - Clean Efficient Smelting”. GME'99 Global Metals Environment Conference (Nonferrous Metals Society of China), Beijing, 1999, p. 164 – 170.

6. Промышленный угольный фильтр TRION модель T-Carb [Электронный ресурс] – 2015. URL: http://www.klimat.zp.ua/ochistiteli_vozduha/t-carb/ (дата обращения: 17.02.2017).

Promyshlennyy ugol'nyy fil'tr TRION model' T-Carb [The TRION industrial coal filter, T-Carb model] [Electronic resource] (2015). Available at: http://www.klimat.zp.ua/ochistiteli_vozduha/t-carb/ (accessed 17.02.2017).

7. Промышленные фильтры воздуха FMP [Электронный ресурс] – 2016. Режим доступа: <http://air-ukraine.com.ua/promyshlennaja-ochistka-vozduha.php> (дата обращения: 17.02.2017).

Promyshlennyye fil'try vozdukha FMP [The FMP industrial air filters] [Electronic resource] (2016). Available at: <http://air-ukraine.com.ua/promyshlennaja-ochistka-vozduha.php> (accessed 17.02.2017).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.В. Мамаевым.
Дата поступления рукописи 20.02.2017

*Aleksandr Ivanovich Serdyuk, Dr. of Chemistry, professor; e-mail: ecoalserdiuk@rambler.ru;
Margarita Maratovna Yalalova, trainee-teacher; e-mail: yalalova-rita@mail.ru
The State Educational Institution of Higher Occupational Education "The Donbas National Academy
of Civil Engineering and Architecture"
286123, city Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone (+38 0623) 22-74-71*

SAFETY WHEN USING THE FLUOSILICIC ELECTROLYTE FOR LEADING

Purpose. Determination of quantitative parameters of lead and fluorides emissions into the environment as super-toxic as well as choice of methods of purification of the atmospheric air from plumbous substances.

Methods. The experimental investigations are based on determination of the lead and fluorides emissions from the surface of the electrolyte.

Results. The analysis of the data obtained shows that the electrolytes are toxic to the various degree according to the general number of the emissions by maintaining the equally good operational characteristics.

Scientific novelty. The quantitative characteristics of the lead and fluorides emissions into the air of the working area from the surface of the fluosilicic electrolyte for leading were determined for the first time.

Practical value. The results received can be used for working-out the less toxic electrolytes for leading by maintaining the high operational properties.

Keywords: *industrial safety; leading; fluosilicic electrolyte; emissions; lead compounds; fluorides.*

УДК 331.45:061.5

Николай Сергеевич Подгородецкий, канд. техн. наук, доц.; e-mail: n.s.podgorodetskiy@donnasa.ru
Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»
286123, Макеевка, ул. Державина, 2. Тел. + 38 071-302-49-56

**ПРИОРИТЕТНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ОРГАНИЗАЦИИ
БЕЗОПАСНОЙ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ**

Цель. Разработать мероприятия по созданию здоровых и безопасных условий труда.

Методика. Анализ факторов, влияющих на состояние охраны труда и промышленной безопасности на предприятиях ДНР.

Результаты. Разработаны мероприятия по созданию здоровых и безопасных условий труда.

Научная новизна. Предложены приоритетные направления в нормотворческой деятельности по охране труда и мероприятия по формированию политики в области охраны труда на предприятиях.

Практическая значимость. Результаты анализа могут быть использованы при разработке и внедрении системы управления охраной труда и промышленной безопасности на предприятиях.

Ключевые слова: *охрана труда; промышленная безопасность; несчастный случай на производстве; производственный травматизм.*

Постановка проблемы. За 2016 г. на предприятиях Донецкой Народной Республики расследовано 629 несчастных случаев, из которых 496 рассматривают как случаи, связанные с производством; пострадало 504 человека. У работников предприятий вновь выявлено 146 случаев профессиональных заболеваний различной этиологии [1].

Несмотря на то, что в 2016 г. уровень травматизма на предприятиях Республики по сравнению с 2015 г. снизился на 8 % [2], он остается одним из самых высоких на территории СНГ, что приводит к большим материальным затратам.

Так, по данным Фонда социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний ДНР, в 2016 г. проведены ежемесячные страховые выплаты на общую сумму 1 090,2 млн руб. [3]. Донецким Республиканским протезно-ортопедическим центром для 296 пострадавших на производстве изготовлено 1 285 протезно-ортопедических изделий на сумму 3,9 млн руб. (в том числе протезы на 2,5 млн руб.; обувь на 1,3 млн руб.; ортезы на 69,5 тыс. руб. и др.) [4].

Проведенный анализ состояния условий труда, уровня промышленной безопасности может быть использован при разработке мероприятий по улучшению состояния условий труда, повышению уровня промышленной безопасности с целью снижения государственных расходов, связанных с выплатами потерпевшим и их реабилитацией.

Цель исследований. Выполнить анализ условий труда, уровня промышленной безопасности на предприятиях ДНР. Разработать мероприятия по созданию здоровых и безопасных условий труда.

Материалы и результаты исследований. Анализируя практику применения Закона ДНР «Об охране труда», можно сделать вывод, что отдельные его положения ориентированы на сформированную в государстве структуру работодателей. Закон определяет приоритет финансирования профилактики производственного травматизма и предупреждения профессиональных заболеваний перед компенсацией ущерба за утрату трудоспособности.

Экономические санкции, применяемые к работодателям, которые нарушили законодательство об охране труда, переносятся на валовые издержки, то есть на трудовой коллектив, а поэтому малоэффективны. В частности, при нанесении ущерба вследствие нарушения требований охраны труда, допущении случаев травматизма или иного повреждения здоровья работника на производстве отсутствует эффективный механизм компенсации этого ущерба за счет виновных лиц.

Наиболее негативные последствия имеет несогласованность положений Закона ДНР «Об охране труда» и норм других законодательных актов, разработанных различными структурами государственного управления по вопросам социально-экономической и политической жизни Республики. На законодательном уровне не установлена структура и объемы подготовки высшими учебными заведениями специалистов по дисциплинам: «Безопасность жизнедеятельности», «Основы охраны труда», «Охрана труда в отрасли» и «Гражданская защита». Требуется существенного улучшения работы органов государственного управления охраной труда на всех уровнях.

В течение последних трех лет постоянно возрастают риски возникновения техногенных аварий и катастроф, гибели, травмирования или нанесения ущерба здоровью граждан вследствие: боевых действий на территории Республики; несовершенства техники и технологий; износа машин, механизмов, оборудования и других технических средств; массовых нарушений правил эксплуатации этих средств; недостатков нормативно-технической документации; организации контроля за выполнением требований безопасности на всех стадиях производства промышленной продукции, в проведении ее проверки, испытаний, экспертизы, сертификации и т.д.

Увеличивается количество отказов, повреждений, отклонений от нормальных режимов работы технических устройств на опасных производственных объектах, которые являются по сути предвестниками возможных аварий.

На состояние промышленной безопасности оказывает влияние высокая степень износа основных производственных фондов, особенно оборудования и технических приспособлений, применяемых на объектах повышенной опасности. В условиях экономической блокады и ограниченных

инвестиционных возможностей для замены оборудования приоритетным направлением должно стать проведение комплекса мероприятий по развитию его экспертно-технической диагностики и изучению остаточного ресурса эксплуатации. Это позволит оптимально минимизировать расходы на реконструкцию и восстановление основных производственных фондов, капитальный и текущий ремонт промышленного оборудования, а также снизить внеплановые расходы, связанные с ликвидацией последствий техногенных аварий.

Наряду с приведенными выше причинами несчастных случаев на производстве, отмечается негативное влияние человеческого фактора: ошибочные действия инженерно-технических работников; незнание работодателями и персоналом элементарных требований охраны труда и безопасного выполнения работ. Необходимо неотложное принятие мер для повышения качества обучения вопросам охраны труда и промышленной безопасности, а также ужесточение требований при допуске персонала к выполнению работ на опасных производственных объектах и особенно при выдаче работодателям разрешительных документов на выполнение работ, эксплуатацию машин, механизмов, оборудования повышенной опасности. Опасность для работников и окружающей среды представляет также использование традиционных норм проектирования, методов расчетов и испытаний, строительства и эксплуатации объектов повышенной опасности. В связи с этим необходимо ускорить актуализацию существующих требований промышленной безопасности, которые должны базироваться на прикладных научно обоснованных методиках анализа и оценки риска.

В настоящих условиях формирования производственных отношений в ДНР практически все основные вопросы обеспечения безопасных и безвредных условий труда, а также вопросы промышленной безопасности зависят от уровня ответственности работодателей, значительная часть которых в сложных экономических условиях рассматривает затраты на эти цели как резервы для снижения затрат на производство.

Действующее законодательство недостаточно полно и комплексно охватывает проблему безопасности технических средств труда. Учитывая стремление нашей Республики интегрироваться как полноправный партнер в мировое сообщество, приобретает большое значение и требует решения проблема повышения конкурентоспособности отечественной промышленной продукции на внутреннем и внешнем рынках, а также запрет поставки на территорию Республики некачественной промышленной продукции иностранного производства.

Повышение уровня безопасности средств производства обеспечит существенное снижение человеческих и материальных потерь, рост конкурентоспособности промышленной продукции, выпускаемой предприятиями ДНР, и как следствие увеличение объемов ее экспорта, укрепление экономического потенциала Республики. Наряду с этим

существенно повысится уровень социальной защиты граждан, а также защиты прав и интересов собственников предприятий в случаях нанесения им ущерба вследствие изготовления или допуска к эксплуатации опасного оборудования.

Также необходимо установить оптимальное соотношение между разными видами государственных нормативно-правовых актов по охране труда и привести их в соответствие с требованиями конвенций Международной организации труда, договоров Содружества Независимых Государств и других международных документов.

Очень часто работодатели, аргументируя причины травматизма, объясняют его износом оборудования, пытаясь прикрыть собственную бесхозяйственность, инженерно-техническую беспомощность. Вместо того чтобы путем технической экспертизы и санитарно-технических исследований определить состояние условий труда, сроки пригодности соответствующих машин, механизмов, оборудования и своевременно провести ремонтно-восстановительные работы, работодатель ищет экономическую целесообразность в действиях вопреки требованиям охраны труда. Среди большинства руководителей предприятий нет понимания того, что основным стимулом в их работе должен быть, прежде всего, положительный имидж предприятия, где безопасность производства рассматривается как фактор конкурентоспособности. Руководитель обязан создать на рабочем месте в каждом структурном подразделении условия труда, соответствующие нормативно-правовым актам, а также обеспечить соблюдение требований законодательства относительно прав работников в области охраны труда.

Низкий уровень трудовой дисциплины, недостаточное внимание к вопросам охраны труда имеют место и среди рядовых работников. Часто сами работники идут на нарушение требований охраны труда, что приводит к угрозе их жизни и здоровью. Необходимо не допустить такие действия, которые ведут к человеческим жертвам, травмам, болезням, создать такие условия труда, при которых была бы очевидна приоритетность личной безопасности и безопасности окружающих на производстве.

Дальнейшего совершенствования требует взаимодействие органов государственного надзора в области охраны труда с центральными и местными органами исполнительной власти. Внедрение современных методов регулирования промышленной безопасности обеспечит перенос акцента осуществления надзорной деятельности с контроля за соблюдением конкретных требований нормативно-правовых актов по охране труда и промышленной безопасности на надзор за функционированием систем управления охраной труда и промышленной безопасностью. Неотъемлемыми составляющими планов работы этих органов должны стать специальные проверки состояния соблюдения законодательства в области охраны труда и промышленной безопасности.

Выводы. Достижение существенного улучшения в охране труда и промышленной безопасности возможно только при условии, что одновременно

с ростом экономики ДНР будут приняты следующие эффективные меры по обеспечению безопасных условий труда:

- создание механизма личной заинтересованности работодателей в организации безопасных условий труда;
- согласование положений и норм законодательных актов с требованиями Закона ДНР «Об охране труда»;
- развитие экспертно-технической диагностики и изучение остаточного ресурса основных производственных фондов и промышленного оборудования;
- повышение качества обучения вопросам охраны труда и промышленной безопасности в образовательных учреждениях;
- повышение эффективности функционирования существующей комплексной системы осуществления и экспертно-технического обеспечения государственного горного и технического надзора в ДНР;
- разработка общих требований к системе управления охраной труда и промышленной безопасностью, а также методических рекомендаций, учитывающих отраслевую специфику предприятий, эксплуатирующих объекты повышенной опасности;
- повышение уровня безопасности использования технических средств труда путем контроля качества изготовления выпускаемой предприятиями ДНР промышленной продукции, а также запрета поставки на территорию Республики некачественной промышленной продукции иностранного производства;
- изменение менталитета работодателей и производственного персонала, их отношения к условиям труда, при которых безопасность производства будет рассматриваться как фактор конкурентоспособности, а основным приоритетом в работе будет, прежде всего, личная безопасность и безопасность окружающих.

Список литературы / References

1. Профилактика несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний [Электронный ресурс] / Фонд социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний Донецкой Народной Республики. – Донецк, 2016-2017. URL: <http://www.fondnsdnr.ru/page/prevention-unhappy-cases-on-production-and-professional-diseases> (дата обращения: 21.02.2017).

Profilaktika neschastnykh sluchayev na proizvodstve i professional'nykh zabolevaniy [Prevention of accidents at work and occupational diseases] [Electronic resource]. *Fond sotsial'nogo strakhovaniya ot neschastnykh sluchayev na proizvodstve i professional'nykh zabolevaniy Donetskoy Narodnoy Respubliki* [Social Insurance Fund from Accidents at Work and Occupational Diseases of the Donetsk People's Republic]. Donetsk, 2016-2017. – Available at:

<http://www.fondnsdnr.ru/page/prevention-unhappy-cases-on-production-and-professional-diseases> (accessed 21.02.2017).

2. Количество случаев травматизма на предприятиях Республики в 2016 г. сократилось на 8 % [Электронный ресурс] / Государственный комитет горного и технического надзора Донецкой Народной Республики. – Донецк, 2017. URL: <http://gkgtn.ru/info/novosti/kolichestvo-sluchayev-travmatizma-na-predpriyatiyakh-respubliki-v-2016-g-sokratilos-na-8/> (дата обращения: 21.02.2017).

Kolichestvo sluchayev travmatizma na predpriyatiyakh Respubliki v 2016 g. sokratilos' na 8 % [The number of injuries at the enterprises of the Republic has decreased in the year 2016 by 8 %] [Electronic resource]. *Gosudarstvennyy komitet gornogo i tekhnicheskogo nadzora Donetskoy Narodnoy Respubliki* [The State Committee of Mining and Engineering Supervision of the Donetsk People's Republic]. Donetsk, 2017. Available at: <http://gkgtn.ru/info/novosti/kolichestvo-sluchayev-travmatizma-na-predpriyatiyakh-respubliki-v-2016-g-sokratilos-na-8/> (accessed 21.02.2017).

3. Возмещение ущерба потерпевшим [Электронный ресурс] / Фонд социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний Донецкой Народной Республики. – Донецк, 2016-2017. URL: <http://www.fondnsdnr.ru/page/возмещение-ущерба-потерпевшим.html>. (дата обращения: 21.02.2017).

Vozmeshcheniye ushcherba poterpevshim [Compensation of damage to the victims] [Electronic resource]. *Fond sotsial'nogo strakhovaniya ot neschastnykh sluchayev na proizvodstve i professional'nykh zabolevaniy Donetskoy Narodnoy Respubliki* [Social Insurance Fund from Accidents at Work and Occupational Diseases of the Donetsk People's Republic]. Donetsk, 2016-2017. – Available at: <http://www.fondnsdnr.ru/page/cancellation-damage-to-the-survivors.html>. (accessed 21.02.2017).

4. Медицинская и социальная реабилитация потерпевших на производстве [Электронный ресурс] / Фонд социального страхования от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний Донецкой Народной Республики. – Донецк, 2016-2017. URL: <http://www.fondnsdnr.ru/page/медицинская-и-социальная-реабилитация-потерпевших-на-производстве.html> (дата обращения: 21.02.2017).

Meditinskaya i sotsial'naya rehabilitatsiya poterpevshikh na proizvodstve [The medical and social rehabilitation of the victims at work] [Electronic resource]. *Fond sotsial'nogo strakhovaniya ot neschastnykh sluchayev na proizvodstve i professional'nykh zabolevaniy Donetskoy Narodnoy Respubliki* [Social Insurance Fund from Accidents at Work and Occupational Diseases of the Donetsk People's Republic]. Donetsk, 2016-2017. – Available at: <http://www.fondnsdnr.ru/page/medical-and-social-rehabilitation-victims-on-production.html> (accessed 21.02.2017).

Nikolay Sergeyevich Podgorodetskiy, Cand. Sci. (Tech.), associate professor;

e-mail: n.s.podgorodetskiy@donnasa.ru

The State Educational Institution of Higher Occupational Education “The Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture”

286123, Makeyevka, 2, ulitsa Derzhavina. Phone +38 071 302-49-56

PRIORITY DIRECTIONS IN THE ORGANIZATION OF THE SAFE PRODUCTION ACTIVITY

Purpose. To work out measures on creation of the healthy and safe working conditions.

Methods. Analysis of the factors influencing on the state of the labor protection and industrial safety at enterprises of the Donetsk People’s Republic.

Results. The measures on creation of the healthy and safe working conditions have been worked out.

Scientific novelty. The priority directions in the legislation on the labor protection and measures on formation of the policy in the field of the labor protection at the enterprises are proposed.

Practical value. The results of the analysis can be used by the working-out and introduction of the labor protection and industrial safety at the enterprises control system.

Keywords: *labor protection; industrial safety; industrial accident; occupational traumatism.*

УДК 617-089:616-073.75

Наталья Владимировна Момот, д-р мед. наук, главный врач; e-mail: doktmo@doktmo.dn.ua;

Иван Александрович Плахотников, замглавврача; e-mail: doktmo@doktmo.dn.ua;

Юрий Дмитриевич Костямин, врач-хирург; e-mail: kostiamin@mail.ru;

Александр Сергеевич Кузнецов, д-р мед. наук, завотделением; e-mail: kouznetsov@mail.ru

*Донецкое клиническое территориальное медицинское объединение (ДоКТМО) МЗО ДНР
283003, Донецк, пр. Ильича, 14. Тел. +38 071 300-72-22*

ХИРУРГИЧЕСКОЕ ЛЕЧЕНИЕ ПОСТРАДАВШИХ С ОСКОЛОЧНО-ОГНЕСТРЕЛЬНЫМИ РАНЕНИЯМИ МЯГКИХ ТКАНЕЙ

Цель. Повышение эффективности хирургического лечения пациентов с инородными телами в мягких тканях путем использования интраоперационного мультиплоскостного рентгенологического контроля.

Методика. Изучены результаты лечения 316 пострадавших от осколочно-огнестрельных ранений, прошедших лечение в отделении кардио- и рентгеноваскулярной хирургии ДоКТМО в 2014...2016 гг.

Результаты. Применение интраоперационного мультиплоскостного рентгеноскопического контроля позволило успешно прооперировать 316 пациентов с инородными телами в мягких тканях, сократить средние сроки стационарного и амбулаторного лечения пострадавших. Эволюция узкоспециализированной медицинской практики привела к качественно иным возможностям удаления инородных тел из мягких тканей.

Научная новизна. Обосновано преимущество применения мультиплоскостной рентгеноскопии в хирургическом лечении пациентов с инородными телами в мягких тканях. Доказана хирургическая эффективность рентгенассистированного удаления инородных тел в сравнении со стандартной методикой их удаления, кроме того отсутствует необходимость применения наркоза и/или спинно-мозговой анестезии. Разработаны новые подходы в хирургическом лечении пациентов с инородными телами в мягких тканях.

Практическая значимость. Результаты сравнительной оценки эффективности лечения с использованием рентгенассистированного удаления инородных тел и традиционных методик удаления инородных тел из мягких тканей определили значительные преимущества интраоперационной мультиплоскостной рентгенассистенции, которые позволили значительно оптимизировать и упростить технику удаления осколков, снизить время стационарного и амбулаторного лечения пациентов.

Ключевые слова: *инородное тело; удаление инородных тел; осколок; рентгенассистенция; мягкие ткани.*

Постановка проблемы. Количество локальных военных конфликтов с применением минно-осколочного вооружения растет, помимо этого возрастает риск террористической угрозы мирному населению в местах большого скопления людей [1]. Главной задачей современного вооружения является выведение из строя живой силы противника путем уничтожения или глубокой инвалидизации раненых. Анализ огнестрельных повреждений мягких тканей в ходе современных военных конфликтов (Чечня, Абхазия, Южная Осетия, Донбасс) свидетельствует, что слепые осколочно-огнестрельные ранения составляют 80...85 % от общего их количества [2]. В таких случаях большая

часть пострадавших объединена общим признаком – наличием остаточного ранящего снаряда в мягких тканях. Задачей медицинской службы в данной ситуации является оптимальное и быстрое восстановление раненых после минно-осколочных повреждений [3].

Анализ последних исследований. Проведенный анализ отечественных и зарубежных источников литературы, в которых публикуются обобщенные данные различных хирургических школ и клиник, показал, что в мировой медицинской литературе нет четких показаний к удалению остаточных инородных тел в ранний период (при первичной хирургической обработке ран) и в поздние сроки (от 2 недель до 12 месяцев) [4]. Осколок, не удаленный из мягких тканей, увеличивает риск инфекционных осложнений (местных и общих), провоцирует развитие болевого синдрома с возможным последующим развитием неврологического дефицита поврежденной конечности, повышается риск кровотечения вследствие протрузии инородного тела ближайшего кровеносного сосуда [5].

Цель исследования – повышение эффективности хирургического лечения пациентов с инородными телами в мягких тканях путем использования интраоперационного мультиплоскостного рентгенологического контроля.

Задачи исследования

1. Проанализировать результаты хирургического лечения пациентов с инородными телами в мягких тканях.
2. Оптимизировать тактику и технику хирургического лечения пациентов с инородными телами в мягких тканях путем применения рентгенассистированного удаления инородных тел.
3. Провести сравнительный анализ результатов оказания хирургической помощи пациентам с инородными телами в мягких тканях при помощи традиционной методики и с применением рентгенассистированного удаления инородных тел.

Материалы и результаты исследований. Изучены результаты лечения пострадавших после осколочно-огнестрельных ранений в ДоКТМО за 2014...2016 гг. Критерии включения в исследование: наличие свежей осколочно-огнестрельной раны с остаточным инородным телом в мягких тканях. Все пациенты были разделены на несколько групп. Исследованная группа № 1 состояла из 316 пациентов, прооперированных при помощи рентгенассистированного удаления инородных тел в первые сутки после поступления в клинику (самое раннее – через 7 мин, самое позднее – через 3 ч после поступления). Для сравнения результатов лечения с использованием интраоперационной мультиплоскостной рентгеноскопии с результатами традиционной хирургической методики лечения была выбрана исследованная группа № 2, которая состояла из 29 пациентов с осколочно-огнестрельными ранениями мягких тканей. В контрольную группу вошли 32 пациента со слепыми осколочно-огнестрельными ранениями мягких тканей, в лечении которых применяли только консервативные методы лечения (инородные тела

не удаляли из мягких тканей). Все группы были репрезентативными и сопоставимыми по полу, возрасту, нозологии, наличию сопутствующей патологии. При сравнении пациентов исследуемых групп конечными точками были: длительность стационарного и амбулаторного лечения, сложность применяемой анестезии, размер операционного доступа и длительность оперативного вмешательства.

На основании данных врачей Международного комитета Красного Креста глубокорасположенные в мягких тканях инородные тела удалению не подлежат. Исключением являются:

- инородные тела, вызывающие расстройства функций жизненно важных органов (стеноз гортани, перфорацию полого органа, кровотечение, кишечную непроходимость и т.д.);
- все доступные инородные тела при первичной обработке ран (около 10 % всех инородных тел);
- инородные тела, вызывающие значительные функциональные нарушения или оказывающие давление на сосуды и нервы;
- показаниями для позднего удаления инородных тел (при частичном или полном заживлении раневого канала) могут быть поддерживаемое инфицирование раны, образование свищей, повторные кровотечения, выраженная болезненность.

Тщательно проанализировав все используемые приспособления и изобретения для верификации осколка в ране в процессе операции, сделали вывод, что данные изобретения значительно удлиняют и усложняют оперативное вмешательство, что ввиду большого поступления раненных и пострадавших является отрицательным фактором, даже несмотря на повышение процента удачных операций. На основании всего вышперечисленного было принято решение о разработке новой хирургической методики для ревизии и извлечения инородных тел из мягких тканей.

Среднее время стационарного лечения пациентов исследуемой группы № 1 по сравнению с исследуемой группой № 2 меньше на 60 % (табл. 1). Полученное значение t-критерия Стьюдента 1,97 с критическим при $p = 0,05$. Так как рассчитанное значение критерия больше критического, делаем вывод, что наблюдаемые различия статистически значимы (уровень значимости $p < 0,05$). Среднее время амбулаторного лечения пациентов исследуемой группы № 1 по сравнению с исследуемой группой № 2 меньше на 25 %. Полученное значение t-критерия Стьюдента 2,197 с критическим при $p = 0,05$. Так как рассчитанное значение критерия больше критического, делаем вывод, что наблюдаемые различия статистически значимы (уровень значимости $p < 0,05$). Среднее время стационарного лечения пациентов исследуемой группы № 1 по сравнению с группой контроля меньше на 83 %. Полученное значение t-критерия Стьюдента 2,77 с критическим при $p = 0,05$. Так как рассчитанное значение критерия больше критического, делаем вывод, что наблюдаемые различия статистически значимы (уровень значимости $p < 0,05$).

Среднее время амбулаторного лечения пациентов исследуемой группы № 1 по сравнению с группой контроля меньше на 53 %. Полученное значение t-критерия Стьюдента 8,125 с критическим при $p = 0,05$. Так как рассчитанное значение критерия больше критического, делаем вывод, что наблюдаемые различия статистически значимы (уровень значимости $p < 0,05$).

На основании данных табл. 1 сделан вывод, что удаление инородных тел при условии применения интраоперационной мультиплоскостной рентгенассистенции позволяет значительно сократить время пребывания раненных на стационарном и амбулаторном лечении.

На основании данных табл. 2 выявлено значительное уменьшение продолжительности оперативного вмешательства (на 80 %) и снижение размера хирургической раны (75 %). Важным моментом является снижение сложности хирургической манипуляции, что подтверждается отсутствием необходимости в наркозе и в привлечении дополнительных сотрудников к операции.

Таблица 1

Сравнительная характеристика результатов лечения

Характеристика	Исследуемые группы		
	№ 1	№ 2	контрольная
Количество пациентов	316	29	32
Средний возраст пациентов	35,4±8,7	32,2±3,8	33,2±6,7
Исходные гнойные осложнения	+	-	-
Длительность стационарного лечения после оперативного вмешательства, сут	3±2	8±3	18±5
Длительность общего амбулаторного лечения, сут	16±4	24±5	39±7
Общее количество удаленных инородных тел	739	29	-

Таблица 2

Сравнительная характеристика основных особенностей стандартной хирургической методики и рентгенассистированного удаления инородных тел

Вид оперативного лечения	Стандартная хирургическая методика	Рентгенассистированное удаление инородных тел
Средняя длительность процедуры, мин	61	12
Средний размер операционной раны, см	6	1,5
Необходимость применения общей анестезии	+	-
Необходимость в ассистенции	+	-

Эволюция узкоспециализированной медицинской практики привела к качественно иным техническим возможностям удаления инородных тел из

мягких тканей. Более благоприятное течение раннего послеоперационного периода в основной группе привело к значительному сокращению сроков стационарного лечения после операции с использованием рентгенассистированного удаления инородных тел.

Выводы. Проведенный анализ лечения пациентов с инородными телами в мягких тканях показал, что традиционная методика значительно устарела (ввиду технических трудностей) и не может быть использована для лечения раненных и пострадавших при массовом их поступлении. Результаты сравнительной оценки эффективности лечения с использованием рентгенассистированного удаления инородных тел и традиционных методик удаления инородных тел из мягких тканей определили значительные преимущества интраоперационной мультиплоскостной рентгенассистенции, которые позволили значительно оптимизировать технику удаления осколков, снизить время стационарного и амбулаторного лечения пациентов. Необходимо помнить, что рентгенассистированное удаление инородных тел возможно только в условиях функционирующей рентгенологической С-дуги. Размещение С-дуги в полевом госпитале, ближайшем к зоне активных боевых действий, позволит быстро и эффективно лечить раненных и пострадавших. Это даст возможность не только значительно снизить нагрузку на ближайшие стационарные медицинские учреждения, но и вернуть 25...30 % пострадавших военнослужащих на боевые позиции.

Список литературы / References

1. Гребнев, Д.Г. Характеристика огнестрельных ранений из травматического оружия, особенности диагностики и хирургического лечения: автореф. дис. ... д-ра мед. наук / Дмитрий Геннадьевич Гребнев. – СПб., 2011. – 16 с.

Grebnev, D.G. *Charakteristika ognestrel'nykh raneniy iz travmaticheskogo oruzhiya, osobennosti diagnostiki i chirurgicheskogo lecheniya. Avtoref. diss. dokt. med. nauk* [Characteristik of gunshot wounds from the traumatic weapon, peculiarities of the diagnostics and surgical treatment. Abstract of a thesis of Dr. med. sci. diss.]. St. Petersburg, 2011, 16 p.

2. Рева, В.А. Обоснование системы временной остановки наружного кровотечения при ранениях магистральных сосудов конечностей на догоспитальном этапе: автореф. дис. ... канд. мед. наук / Виктор Александрович Рева. – СПб., 2011. – 45 с.

Reva, V.A. *Obosnovaniye sistemy vremennoy ostanovki naruzhnogo krovotecheniya pri raneniyakh magistral'nykh сосудов konechnostey na dogospital'nom etape: Avtoref. diss. kand. med. nauk* [Substantiation of the system of the temporary arrest of the external bleeding by gunshot wounds of great vessels of extremities at the pre-hospital stage: Abstract of a thesis of Cand. med. sci. diss.]. St. Petersburg, 2011, 45 p.

3. Жианну, К. Военно-полевая хирургия. Работа хирургов в условиях ограниченности ресурсов во время вооруженных конфликтов и других ситуаций насилия / Кростос Жианну, Марко Балдан, Аза Молде. – Женева: Международный комитет Красного Креста, 2013. – 28 с.

Jiannu, K., Baldan, M., Molde, A. *Voyenno-polevaya khirurgiya. Rabota khirurgov v usloviyakh ogranichennosti resursov vo vremya vooruzhyennykh konfliktov i drugikh situatsiy nasiliya* [Field military surgery. Work of surgeons under conditions of limitedness of resources during armed conflicts and other situations of violence]. Geneva, International Committee of the Red Cross, 2013, 28 p.

4. Бельских, А.Н. Указания по военно-полевой хирургии / А.Н. Бельских, И.М. Самохвалов. – М.: Главное военно-медицинское управление МО РФ, 2013. – 474 с.

Bel'skikh, A.N., Samokhvalov, I.M. *Ukazaniya po voyenno-polevoy khirurgii* [Guidance on the field of the military surgery]. Moscow, Chief medical administration of the Ministry of Defense of the Russian Federation Publ., 2013, 474 p.

5. Колтович, А.П. Тяжелые сочетанные, множественные и комбинированные минно-взрывные ранения (диагностика и хирургическое лечение): дис. ... канд. мед. наук / Алексей Петрович Колтович. – М., 2011. – 126 с.

Koltovich, A.P. *Tyazhyelyye sochetannyye, mnozhestvennyye i kombinirovannyye minno-vzryvnyye raneniya (diagnostika i khirurgicheskoye lecheniye): Diss. kand. med. nauk* [The hard associated multiple and combined mine-explosive gunshot wounds (diagnostics and surgical treatment): Cand. med. sci. diss.]. St. Petersburg, 2011, 126 p.

Рекомендовано к публикации д-ром мед. наук В.В. Черкесовым.
Дата поступления рукописи 06.03.2017

Natalya Vladimirovna Momot, Dr. Sci. (Med.), head doctor; e-mail: doktmo@doktmo.dn.ua;

Ivan Aleksandrovich Plakhotnikov, deputy head doctor; e-mail: doktmo@doktmo.dn.ua;

Yuri Dmitriyevich Kostyamin, doctor-surgeon; e-mail: kostiamin@mail.ru;

Aleksandr Sergeyeovich Kuznetsov, Dr. Sci. (Med.), head of department; e-mail: kouznetsov@mail.ru

The Donetsk Clinical Territorial Medical Amalgamation (DoKTMO) of the Ministry of Public Health of the DPR

283003, Donetsk, 14, prospect Illicha. Phone +38 071 300-72-22

SURGICAL TREATMENT OF THE VICTIMS WITH MISSILE GUNSHOT WOUNDS OF SOFT TISSUES

Purpose. The higher efficiency of the surgical treatment of patients with foreign bodies in the soft tissues by means of the use of the intraoperative multiplane X-ray control.

Methods. The results of treatment of 316 victims with the missile gunshot wounds medically treated in the department of cardio- and X-ray-vascular surgery of the Donetsk Clinical Territorial Medical Amalgamation (DoKTMO) in the years 2014...2016 were studied.

Results. The use of the intraoperative multiplane X-ray control permitted to successfully operate on 316 patients with the foreign bodies in the soft tissues, to shorten the medium terms of the stationary and ambulant treatment of the victims. The evolution of the highly tailored medical practice resulted in the qualitatively other possibilities of the surgical removal of the foreign bodies from the soft tissues.

Scientific novelty. The advantage of the use of the multiplane roentgenoskopy in the surgical treatment of the patients with the foreign bodies in the soft tissues is substantiated. The surgical efficiency of the X-ray-assisted removal of the foreign bodies has been proved in comparison with the standard methods of their removal, besides that the necessity of the use of anesthesia and/or spinal anesthesia lacks. The new approaches in the surgical treatment of the patients with the foreign bodies in the soft tissues have been worked out.

Practical value. The results of the comparative estimation of the efficiency of the treatment with the use of the X-ray-assisted removal of the foreign bodies and of the traditional methods of removal of the foreign bodies from the soft tissues determined the considerable advantages of the intraoperative multiplane X-ray-assistance that allowed optimizing and simplifying the techniques of the removal of the splinters substantially, shortening the time of the stationary and ambulant treatment of the patients.

Keywords: *foreign body; removal of foreign bodies; splinter; X-ray-assistance; soft tissues.*