



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

НАУЧНЫЙ ВЕСТНИК НИИГД «РЕСПИРАТОР»

Научно-технический журнал

№ 1(57)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1970 г.

Донецк
2020

Научный вестник НИИГД «Респиратор»: науч.-техн. журн. – Донецк, 2020. – № 1(57). – 114 с.

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

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

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

Редакционная коллегия:

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

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 № 1 от 30.01.2020).

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 Defence, Emergencies
and Elimination of Consequences of Natural Disasters

SCIENTIFIC BULLETIN OF THE NIIGD "RESPIRATOR"

Scientific-technical journal

No. 1(57)

Published quarterly

Founded in 1970

Donetsk
2020

UDC 614.8"363"+355.244.2+622.867

Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal. – Donetsk, 2020. – No. 1(57). – 114 p.

The results of investigations in the field of protection of population and territories in emergencies, of anthropogenic safety, prevention and fighting the fires at the mines, creation of the mine-rescue equipment, life-saving the people by underground accidents are expounded. The journal is included in the list of reviewed scientific publications in which the basic scientific results of dissertations for degrees of doctor and candidate of sciences should be published (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 Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters.

Editorial board:

Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Ageyev – editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Grekov – deputy editor-in-chief
Dr. Sci. (Tech.)	Yu.F. Bulgakov
Dr. Sci. (Tech.)	S.P. Vysotskiy
Dr. Sci. (Tech.)	A.F. Dolzhenkov
Dr. Sci. (Tech.)	S.G. Yekhilevskiy (Republic of Belarus)
Dr. Sci. (Tech.)	V.G. Igishev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	V.A. Kanin
Dr. Sci. (Tech.)	A.P. Kovalyov
Dr. Sci. (Tech.)	V.P. Koptikov (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	K.N. Labinskiy
Dr. Sci. (Tech.)	V.V. Mamayev
Dr. Sci. (Tech.)	F.V. Nedopekin
Dr. Sci. (Tech.)	D.Yu. Paleyev (Russian Federation)
Dr. Sci. (Tech.)	G.P. Starikov
Cand. Sci. (Tech.)	V.S. Kharkovskiy (Republic of Kazakhstan)
Dr. Sci. (Chem.)	V.V. Shapovalov

The journal is included in the database of the "Russian Science Citation Index" (РИЛИ) (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. 1 from 30.01.2020).

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ***I. Пожарная и промышленная
безопасность*****Кострубицкий А.А., Агеев В.Г.,
Дикенштейн И.Ф.**Экономическая эффективность
деятельности газодымозащитной
службы МЧС ДНР

7

Мамаев В.В., Кирьян А.П.Математическое моделирование
процессов в регенеративном патроне
респиратора с химически связанным
кислородом

18

Греков С.П., Всякий А.А.Экспериментально-аналитическое
определение коэффициентов диффузии
в углях по темпу истечения метана

25

**Пeftибай Г.И., Галухин Н.А.,
Мозалевский Д.А.**Параметры средств забора воды
из пожарно-оросительного
трубопровода

33

Орликова В.П., Головченко Е.А.Распределение внешней влаги
в частицах угля

44

***II. Безопасность в чрезвычайных
ситуациях*****Иваненко А.Ф., Мухин П.Е.**Оценка риска возникновения
чрезвычайных ситуаций

54

Козлитин А.А., Лебедева В.В.Методика обнаружения компонентов
нефтепродуктов во фрагментах
горевших материалов

62

TABLE OF CONTENTS***I. Fire and industrial safety*****Kostrubitskiy A.A., Ageyev V.G.,
Dikenshteyn I.F.**Cost-effectiveness of the gas and smoke
protection service of the Ministry of the
Donetsk People's Republic for Civil
Defence, Emergencies and Elimination
of Consequences of Natural Disasters**Mamayev V.V., Kiryan A.P.**Modeling of processes in a regenerative
cartridge of a breathing apparatus,
chemical oxygen type**Grekov S.P., Vsyakiy A.A.**Experimental and analytical determination
of diffusion coefficients in coal by methane
release rate**Peftibay G.I., Galukhin N.A.,
Mozalevskiy D.A.**Parameters of means for drafting water
from a fire-irrigation pipeline**Orlikova V.P., Golovchenko Ye.A.**Distribution of surface moisture
in coal particles***II. Safety in emergencies*****Ivanenko A.F., Mukhin P.Ye.**Risk assessment of occurrence
of emergency situations**Kozlitin A.A., Lebedeva V.V.**Methodology for detecting the constituents
of petrochemical products in fragments
of burnt materials

**Плетенецкий Р.С., Чапкович А.В.,
Францев В.И., Котляров В.Л.**
Проверка огнестойкости дыхательных
аппаратов

71

**Pletenetskiy R.S., Chapkovich A.V.,
Frantsev V.I., Kotlyarov V.L.**
Fire resistance testing of breathing
apparatuses

***III. Охрана труда
и экологическая безопасность***

Долженков А.Ф., Мороз Т.О.
Нейтрализация продуктов горения
резины водой

80

Dolzhenkov A.F., Moroz T.O.
Neutralization of products of rubber
combustion with water

Мавроди А.В., Захлебин В.В.
Программное обеспечение
горноспасательных работ

86

Mavrodi A.V., Zakhlebin V.V.
Software for mine-rescue operations

Зинченко И.Н., Пашковский О.П.
Пожаробезопасные параметры
породного отвала со слоями глины

95

Zinchenko I.N., Pashkovskiy O.P.
Fire-safe parameters of a waste rock pile
with clay layers

Попов В.Г.
Вредные вещества в аэрозолях
растворов кислот для нейтрализации
газообразного аммиака

103

Popov V.G.
Harmful substances in aerosols
of acid solutions for neutralization
of ammonia gas

Требования к оформлению статьи

113

Requirements of execution of an article

І. Пожарная и промышленная безопасность

УДК 338.14:614.84

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. (+38062) 340-62-28

Владимир Григорьевич Агеев, д-р техн. наук, директор; e-mail: respirator@mail.dnmchs.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) 332-78-41

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ГАЗОДЫМОЗАЩИТНОЙ СЛУЖБЫ МЧС ДНР

Цель. Оценка эффективности деятельности газодымозащитной службы пожарно-спасательных подразделений, разработка методики ее расчета.

Методика. На основании методологии расчета экономических потерь от смертности, заболеваемости и инвалидизации населения разработана методика расчета предотвращенного ущерба вследствие спасения людей на пожаре.

Результаты. Получена методика расчета экономической эффективности деятельности пожарно-спасательных подразделений, в том числе и газодымозащитной службы.

Научная новизна. В работе использован метод расчета ущерба от гибели и травмирования людей на пожаре при определении виртуальной прибыли от спасения людей.

Практическая значимость. Методика использована при расчете экономической эффективности деятельности газодымозащитной службы МЧС ДНР за 2017...2018 гг.

Ключевые слова: *пожар; ущерб; социальный ущерб; предотвращенный ущерб; количество погибших; количество спасенных; газодымозащитная служба; экономическая эффективность.*

Постановка проблемы. Экономическая безопасность – важнейший функциональный элемент, от которого зависит состояние и будущее любой экономической системы.

В широком смысле слова под экономической безопасностью понимают процесс создания условий устранения возможных негативных воздействий на жизненно важные экономические интересы личности, общества и государства.

Негативное воздействие потенциальных факторов и угроз на любой из уровней экономической безопасности может стать дестабилизирующим по отношению к личности, социальной, производственной или природной системам, привести к ущербу, дезорганизации или их полному уничтожению [1].

Одной из составляющих экономической безопасности считается пожарная безопасность страны. К проблемам оценки ущерба от пожаров, исследованию пожарной опасности, пожарного риска, их влиянию на безопасность национальной экономики обращались такие ученые, как Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, П. Вагнер, В.А. Акимов [2, 3].

В Донецкой Народной Республике (далее – ДНР) эта проблема практически не изучена. До настоящего времени отсутствует методика, позволяющая оценить совокупный ущерб от пожара и его составляющие и все затраты, связанные с обеспечением пожарной безопасности.

По статистике, ущерб от пожаров, а также средства, выделяемые на обеспечение пожарной безопасности, ежегодно возрастают. Это подтверждает необходимость более точной оценки всех затрат, связанных с пожарами, а также потерь от них.

Анализ последних публикаций. В соответствии с нормативными документами пожар – неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства, а пожарная опасность – угроза возникновения и развития неуправляемого процесса горения (пожара), приносящего вред обществу, окружающей среде, объекту защиты.

В соответствии с данным определением полный ущерб от пожара (сумма прямого и косвенного ущерба) включает материальный, социальный и экологический ущербы (рис. 1) [2].

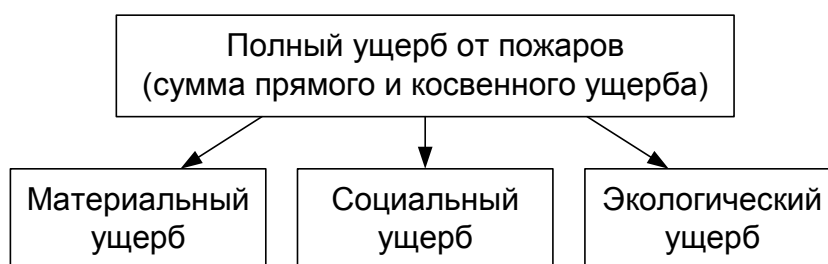


Рис. 1. Виды ущербов от пожара

Один из видов малоизученного ущерба от пожаров – социальный ущерб, или прямой демографический ущерб, который формируется за счет уменьшения трудовых ресурсов вследствие гибели и травмирования людей на пожарах.

Этот вид ущерба имеет прямое отношение к деятельности газодымозащитной службы (далее – ГДЗС) как составной части пожарно-спасательных и аварийно-спасательных подразделений МЧС ДНР. Задымленность помещений и путей эвакуации – основная причина гибели людей, она значительно усложняет действия пожарно-спасательных подразделений. Улучшение деятельности ГДЗС, в том числе с помощью новой техники, приводит к уменьшению количества погибших и, таким образом, является критерием ее эффективности.

Пострадавшие часто исключаются из сферы общественно полезного труда, а государство, в свою очередь, расходует значительные средства из фондов социального обеспечения, страхования и др.

Несмотря на то что все исследователи признают неэтичность и аморальность оценки человеческой жизни, все же оказалось возможным выразить стоимость человеческой жизни исходя из затрат общества на подготовку человека (воспитание, обучение, лечение и т.д.) и потери от его несостоявшейся отдачи.

Так, Национальная ассоциация по безопасности движения США определила стоимость жизни одного американца в 278 тыс. долларов, в том числе 172 тыс. долларов – это потери от прекращения трудовой деятельности человека в случае его гибели [4].

В исследованиях социальные последствия прослеживаются значительно глубже во времени и включают дополнительные ущербы, связанные с разрушением семьи, ростом безнадзорности детей, стрессами и болезнями, общим ухудшением благосостояния людей, сокращением рабочих мест на предприятиях, снижением товарооборота в магазинах, уменьшением количества посетителей в ресторанах, постояльцев в гостиницах и т.д.

Цель исследования – определение экономических потерь от гибели и травмирования людей при пожарах и оценка эффективности деятельности ГДЗС, направленной на предотвращение этих потерь.

Методика и результаты исследований. Минэкономразвития России, Минздравсоцразвития России, Минфином России, Росстатом утверждена методология расчета экономических потерь от смертности, заболеваемости и инвалидизации населения. Предложена методика оценки экономических потерь от гибели и травмирования людей при пожарах.

Экономический ущерб (потери) рассчитывают отдельно по каждой из следующих причин: гибель и травмирование.

При расчете недопроизведенного внутреннего валового продукта (далее – ВВП) считается, что выбывший из трудового процесса человек, отнесенный к определенной группе, осуществлял свою деятельность аналогично среднестатистическому представителю данной группы, продолжающему трудиться.

Экономический ущерб (потери) от гибели и травмирования населения при пожарах рассчитывают по погибшим и травмированным за анализируемый год. При расчете структуры экономического ущерба (потерь) за год параметры, характеризующие гибель и травмирование людей, и данные по необходимым для расчета показателям берут равными параметрам исследуемого года.

Расчет экономического ущерба (потерь) от гибели и травмирования людей осуществляется на основе данных официального статистического учета.

Поскольку более или менее точный учет потерь ВВП вследствие постоянного или временного выбытия травмированных из числа трудоспособного населения затруднителен, исключим травмированных при расчете экономического ущерба. Лишь определенная доля социального ущерба вследствие травмирования людей может быть оценена экономическими показателями, например прямые расходы в области здравоохранения и социального обеспечения.

Экономический ущерб (потери) в производстве ВВП от гибели людей на пожарах в текущем году рассчитывают как упущенную выгоду в производстве ВВП (объем недопроизведенного ВВП) из-за постоянного выбытия (смерти) человека из сферы производства в исследуемом году.

Экономический ущерб, потери от гибели людей рассчитывают отдельно за исследуемый год, а также за период возможного дожития погибшим в исследуемом году до окончания возраста экономической активности.

Экономический ущерб (потери) от гибели людей за отчетный год рассчитывают как произведение численности лиц, погибших от пожаров в возрасте от 18 лет до возраста окончания экономической активности, на удельный объем ВВП (в расчете на одного занятого).

Экономический ущерб (потери) от гибели на пожарах за отчетный год рассчитывают по следующей формуле:

$$Y_{\text{гиб}} = \text{ЧУ}_c \frac{\text{ВВП}}{\text{ЧЗ}}, \quad (1)$$

где $Y_{\text{гиб}}$ – упущенная выгода в производстве ВВП (объем недопроизведенного ВВП) в результате гибели в анализируемом году по причине пожаров в ДНР в этом году;

ЧУ_c – количество погибших от пожаров в ДНР в возрасте от 18 лет до возраста окончания экономической активности;

ВВП – внутренний валовой продукт ДНР;

ЧЗ – численность занятых на производстве в ДНР.

Экономический ущерб (потери) от гибели на пожарах за период возможного дожития умершего в анализируемом году до окончания возраста экономической активности рассчитывается в том числе для погибших в возрасте до 18 лет.

Для расчета потерь за период возможного дожития необходимо учитывать индекс потребительских цен J_n .

Экономические потери от гибели на пожарах за период возможного дожития рассчитывают по следующим формулам.

Для погибших в возрасте до 18 лет

$$Y_{\text{гиб.нс}} = \text{ЧУ}_{\text{нс}} \frac{\text{ВВП}}{\text{ЧЗ}} D_{\text{унс}} J_n; \quad (2)$$

$$D_{\text{унс}} = B_{\text{э}} - B_{\text{гнс}}, \quad (3)$$

где $Y_{\text{гиб.нс}}$ – упущенная выгода в производстве ВВП (объем недопроизведенного ВВП) в результате гибели в анализируемом году по причине пожаров в ДНР с учетом вероятности дожития до возраста экономической активности лиц до 18 лет;

$\text{ЧУ}_{\text{нс}}$ – количество погибших от пожаров в ДНР в возрасте до 18 лет;

$D_{\text{унс}}$ – количество лет экономической активности;

J_n – поправочный коэффициент (индекс потребительских цен 1,2);

$B_{\text{э}}$ – возраст экономической активности;

$V_{\text{гнс}}$ – возраст начала экономической активности лиц, погибших в возрасте до 18 лет (условно принят 18 лет).

Для погибших в возрасте от 18 лет до возраста окончания экономической активности

$$Y_{\text{гиб.с}} = \text{ЧУ}_c \frac{\text{ВВП}}{\text{ЧЗ}} D_{\text{ус}} J_{\text{н}}; \quad (4)$$

$$D_{\text{ус}} = B_{\text{э}} - V_{\text{гс}}, \quad (5)$$

где $Y_{\text{гиб.с}}$ – упущенная выгода в производстве ВВП (объем недопроизведенного ВВП) в результате гибели в анализируемом году по причине пожаров в ДНР с учетом вероятности дожития до возраста экономической активности лиц в возрасте от 18 лет до возраста окончания экономической активности;

ЧУ_c – количество погибших от пожаров в ДНР в возрасте от 18 лет до возраста окончания экономической активности;

$D_{\text{ус}}$ – количество лет экономической активности;

$V_{\text{гс}}$ – средний возраст лиц, погибших в возрасте от 18 лет до окончания экономической активности.

При рассмотрении экономической эффективности работы некоторых пожарно-спасательных служб необходимо учитывать и количество спасенных ими людей. В данном случае это прямой «предотвращенный ущерб» (экономическая виртуальная «прибыль» или «утраченный» ущерб).

Анализ практики применения понятия «предотвращенный ущерб», проведенный в работе [5], показал, что существующие научно-методологические подходы не позволяют осуществить адекватный расчет, а служат лишь инструментом для создания теоретической и информационной базы.

Как показали исследования, научно-методологические подходы к оценке «предотвращенного ущерба» могут быть распределены на следующие категории:

- метод прямого счета [6];
- покомпонентный метод, при котором расчет проводят по отдельным элементам, регламентируемым самостоятельными нормативными документами, которые содержат различные в методологическом отношении технологии расчетов;
- укрупненный (эмпирический) метод, основанный на принципе перенесения на частный исследуемый объект общих закономерностей воздействия ущербообразующих факторов.

Газодымозащитная служба – одна из важнейших структур в составе ГПС МЧС ДНР. Ее основная задача – спасение жизни и здоровья людей, застигнутых пожаром в зданиях и сооружениях, и самих пожарных спасателей от воздействия самого опасного фактора при пожаре – задымленности.

Тогда для ГДЗС показатель эффективности деятельности должен определяться прежде всего по количеству спасенных людей. Спасенными на

пожаре считаются люди и (или) животные, перемещение которых в безопасную зону осуществлялось при непосредственном участии (с помощью) личного состава подразделений пожарной охраны и спасателей, обслуживающего персонала или граждан; эвакуированными считаются люди, покинувшие опасную зону самостоятельно, без непосредственного участия личного состава подразделений пожарной охраны и спасателей до наступления момента воздействия опасных факторов пожара в местах их нахождения. Таким образом, соотношение количества спасенных и эвакуированных может в какой-то мере служить показателем эффективности деятельности пожарной охраны в плане разработки и внедрения систем противодымной защиты, проведения профилактических работ среди населения по спасению эвакуируемых из зоны воздействия опасных факторов пожара.

Суммарное количество спасенных и эвакуированных равняется количеству людей, оказавшихся в зоне пожара. Эффективность рассчитывают как долю спасенных от суммарного количества спасенных и эвакуированных

$$K'_{\text{эф}} = \frac{\text{ЧУ}_{\text{спас}}}{\text{ЧУ}_{\text{спас}} + \text{ЧУ}_{\text{эвак}}}; \quad (6)$$

$$K''_{\text{эф}} = \frac{\text{ЧУ}_{\text{спас}}}{\text{ЧУ}_{\text{спас}} + \text{ЧУ}_{\text{пог}}}, \quad (7)$$

где $\text{ЧУ}_{\text{спас}}$ – количество спасенных на пожарах;

$\text{ЧУ}_{\text{эвак}}$ – количество эвакуированных из зоны пожара;

$\text{ЧУ}_{\text{пог}}$ – количество погибших на пожарах.

С развитием тактического вентилирования возник некий парадокс. Грамотно применяя тактическое вентилирование, устройство дымовых заслонов, используя дымососы и другую технику, пожарные-спасатели обеспечивают незадымленность путей эвакуации и им не приходится экстренно выводить, а то и выносить людей в индивидуальных средствах защиты. «Спасать стало некого», – жалуются опытные пожарные. Количество спасенных резко сократилось, в некоторых регионах РФ в 2,5...4 раза.

В этом случае методика расчета эффективности деятельности перестает работать и необходимо найти новые подходы к оценке экономической эффективности деятельности ГДЗС и других пожарно-спасательных подразделений.

Согласно работе [7] эффективность деятельности ГДЗС рассчитывают как долю количества спасенных людей от суммарного количества спасенных и погибших на пожаре.

Применим описанную выше методологию к оценке эффективности деятельности ГДЗС и других пожарно-спасательных служб.

Экономическая «прибыль» от спасения на пожарах за период возможного дожития рассчитывается по следующим формулам.

Для спасенных в возрасте до 18 лет

$$Y_{\text{спас.нс}} = \text{ЧУ}_{\text{спас}} \frac{\text{ВВП}}{\text{ЧЗ}} D_{\text{унс}} J_{\text{н}}; \quad (8)$$

$$D_{\text{унс}} = B_{\text{э}} - B_{\text{спас.нс}}, \quad (9)$$

где $Y_{\text{спас.нс}}$ – ущерб в производстве ВВП (объем дополнительно произведенного ВВП) в результате спасения в анализируемом году по причине пожаров в ДНР с учетом вероятности дожития до возраста экономической активности лиц до 18 лет;

$\text{ЧУ}_{\text{спас}}$ – количество спасенных от пожаров в ДНР в возрасте до 18 лет;

$B_{\text{спас.нс}}$ – возраст начала экономической активности лиц, спасенных в возрасте до 18 лет (условно принят 18 лет).

Для спасенных в возрасте от 18 лет до возраста окончания экономической активности

$$Y_{\text{спас.с}} = \text{ЧУ}_{\text{спас.с}} \frac{\text{ВВП}}{\text{ЧЗ}} D_{\text{ус}} J_{\text{н}}; \quad (10)$$

$$D_{\text{ус}} = B_{\text{э}} - B_{\text{спас.с}}, \quad (11)$$

где $Y_{\text{спас.с}}$ – ущерб в производстве ВВП (объем дополнительно произведенного ВВП) в результате спасения в анализируемом году по причине пожаров в ДНР с учетом вероятности дожития до возраста экономической активности лиц в возрасте от 18 лет до возраста окончания экономической активности;

$\text{ЧУ}_{\text{спас.с}}$ – количество спасенных от пожаров в ДНР в возрасте от 18 лет до возраста окончания экономической активности;

$B_{\text{спас.с}}$ – средний возраст лиц, спасенных в возрасте от 18 лет до окончания экономической активности.

Для расчета общих экономических потерь с учетом дожития до окончания экономически активного возраста суммируют экономические потери («выгоды») по каждому показателю.

Тогда показатель эффективности деятельности $\mathcal{E}_{\text{ГДЗС}}$, %, определяют по формуле

$$\mathcal{E}_{\text{ГДЗС}} = \left(\frac{Y_{\text{спас}}}{P_{\text{ГДЗС}}} - 1 \right) \cdot 100, \quad (12)$$

где $Y_{\text{спас}}$ – «предотвращенный ущерб», т.е. своего рода виртуальная прибыль от спасения людей в текущем году, млн руб.;

$P_{\text{ГДЗС}}$ – затраты на обеспечение деятельности ГДЗС в текущем году, млн руб.

Изменение экономической эффективности деятельности ГДЗС

$$\Delta \mathcal{E}_{\text{ГДЗС I}} = \mathcal{E}_{\text{ГДЗС II}} - \left(\frac{Y_{\text{спас I}}}{P_{\text{ГДЗС I}}} - \frac{Y_{\text{спас II}}}{P_{\text{ГДЗС II}}} \right) \cdot 100; \quad (13)$$

$$Y_{\text{спас II}} = \frac{Y_{\text{спас I}}}{n_{\text{спас}}}, \quad (14)$$

где $n_{\text{спас}}$ — коэффициент изменения количества спасенных в результате переоснащения ГДЗС средствами индивидуальной и коллективной защиты органов дыхания, средств дымоудаления, внедрения новой тактики вентилирования, дымоосаждения.

В 2018 г. оперативная обстановка с пожарами в Донецкой области характеризовалась следующими основными показателями:

- зарегистрировано 620 пожаров и загораний;
- на пожарах погибло 150 человек, в том числе трое детей;
- получили травмы 180 человек;
- материальный ущерб 180 млн 75 тыс. руб.

Огнем было уничтожено и повреждено 1645 зданий и сооружений различного назначения, 149 единиц транспортных средств, 33 т грубых кормов (см. таблицу).

Статистические показатели обстановки с пожарами в ДНР за 5 лет

Показатель	Год				
	2014	2015	2016	2017	2018
Количество пожаров	5808	4898	5513	8553	6920
Ущерб, млн руб.	495,7	184,7	115,4	162,6	188,1
Погибло людей	151	154	163	118	150
В том числе детей	3	4	1	0	3
Погибло людей в городах и поселках городского типа	140	149	150	112	130
Погибло людей в селах	17	5	13	6	20
Травмировано, чел.	65	88	147	151	180
Уничтожено, повреждено зданий, сооружений (ед.)	3483	1747	1327	2088	1645
Уничтожено, повреждено техники (ед.)	309	138	112	104	149
Уничтожено кормов, т	835	356	130	310	33
Количество пожаров на 10 тыс. населения:					
в населенном пункте городского типа	5148	4369	4825	7136	6016
в сельском населенном пункте	357	292	379	565	364
вне территории населенного пункта	303	237	309	852	540

В 2018 г. с участием ГДЗС было ликвидировано 474 пожара. Личным составом подразделений ГДЗС спасено 823 человека, из которых на пожаре – 230 человек (из них 29 детей), в ситуациях, не достигших квалификационных признаков ЧС, – 533 человека (из них 43 ребенка).

В 2018 г. МЧС ДНР проведена работа по улучшению деятельности ГДЗС, в частности приобретено новое оборудование и техника на сумму 18,6 млн руб. (в 2017 г. – на сумму 4,6 млн руб.).

Экономическая эффективность деятельности ГДЗС МЧС ДНР 3,86 млн руб., т.е. возросла на 27 %.

Выводы. Разработана методика оценки экономической эффективности деятельности ГДЗС МЧС ДНР. Расчеты показали, что за период 2017...2018 гг. «предотвращенный экономический ущерб» (или виртуальный «экономический эффект») равен 3,86 млн руб., а эффективность деятельности службы возросла на 27 %.

Список литературы / References

1. Никитенко, П.Г. Экономическая безопасность: теория, методология, практика / под науч. ред. П.Г. Никитенко, В.Г. Булавко; Ин-т экономики НАН Беларуси. – Минск : Экономика и право, 2009. – 399 с.

Nikitenko, P.G., Bulavko, V.G. (sci. eds). *Ekonomicheskaya bezopasnost': teoriya, metodologiya, praktika* [Economic safety: theory, methodology, practice]. *In-t ekonomiki NAN Belarusi* [The Institute of Economics of the National Academy of Sciences of Belarus]. Minsk, Ekonomika i pravo Publ., 2009, 399 p.

2. Брушлинский, Н.Н. Человечество и пожары / Н.Н. Брушлинский, С.В. Соколов, П. Вагнер. – М. : Маска, 2007. – 143 с.

Brushlinskiy, N.N., Sokolov, S.V., Vagner, P. *Chelovechestvo i pozhary* [Humanity and fires]. Moscow, Maska Publ., 2007, 143 p.

3. Акимов, В.А. Основы анализа и управления риском в природной и техногенной сферах / В.А. Акимов, В.В. Лесных, Н.Н. Радаев. – М. : Деловой экспресс, 2004. – 352 с.

Akimov, V.A., Lesnykh, V.V., Radayev, N.N. *Osnovy analiza i upravleniya riskom v prirodnoy i tekhnogennoy sferakh* [Fundamentals of analysis and management of risk in natural and man-made spheres]. Moscow, Delovoy ekspress Publ., 2004, 352 p.

4. Архипец, Н.Н. Экономическая теория. Ч. 2: Экономика защиты от ЧС / Н.Н. Архипец. – Минск, 2005. – 134 с.

Arkhipev, N.N. *Ekonomicheskaya teoriya. Chast' 2 "Ekonomika zashchity ot chrezvychaynykh situatsiy"* [Economic theory. Part 2 "Economics of protection in emergency situations"]. Minsk, 2005, 134 p.

5. Научно-методические подходы к определению предотвращенного ущерба / М.В. Загуменнова, А.Г. Фирсов, В.И. Сибирко, А.А. Порошин // Актуальные

проблемы пожарной безопасности: материалы XXXI Международной науч.-практ. конф. – М. : ВНИИПО, 2019. – С. 436 – 439.

Zagumennova, M.V., Firsov, A.G., Sibirko, V.I., Poroshin, A.A. *Nauchno-metodicheskiye podkhody k opredeleniyu predotvrashchyennogo ushcherba* [Methodological approaches to determination of averted damage]. *Aktual'nyye problemy pozharnoy bezopasnosti: materialy XXXI Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf.* [Actual problems of fire safety: materials of the 31st International scientific and practical conference]. Moscow, VNIPO Publ., 2019, pp. 436 – 439.

6. Моисеева, Е.Е. Экономическая эффективность противопожарных мероприятий / Е.Е. Моисеева, Д.В. Южаков // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2009. – № 23. – С. 311 – 314.

Moiseyeva, Ye.Ye., Yuzhakov, D.V. *Ekonomicheskaya effektivnost' protivopozharnykh meropriyatiy* [Cost-effectiveness of fire safety measures]. *Aktual'nyye problemy lesnogo kompleksa – Actual problems of forest complex*, 2009, no. 23, pp. 311 – 314.

7. Проблемы оценки эффективности деятельности пожарной охраны по спасению людей / А.А. Порошин, В.В. Харин, Е.В. Бобринев, А.А. Кондашов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы : материалы VIII Всерос. науч.-практ. конф. – Воронеж : ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2017. – С. 589 – 591.

Poroshin, A.A., Kharin, V.V., Bobrinev, Ye.V., Kondashov, A.A. *Problemy otsenki effektivnosti deyatel'nosti pozharnoy okhrany po spaseniyu lyudey* [Problems of evaluation of effectiveness of the fire protection service activity in human rescue]. *Pozharnaya bezopasnost': problemy i perspektivy: materialy VIII Vseros. nauch.-prakt. konf.* [Fire safety: problems and prospects: materials of the 8th All-Russian scientific and practical conference]. Voronezh, FGBOU VO Voronezhskiy institut GPS MChS Rossii Press, 2007, pp. 589 – 591.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 19.08.2019

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

The Ministry of the Donetsk People's Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters

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

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

Igor Feliksovich Dikenshteyn, 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) 332-78-41

COST-EFFECTIVENESS OF THE GAS AND SMOKE PROTECTION SERVICE OF THE MINISTRY OF THE DONETSK PEOPLE'S REPUBLIC FOR CIVIL DEFENCE, EMERGENCIES AND ELIMINATION OF CONSEQUENCES OF NATURAL DISASTERS

Purpose. Evaluation of the effectiveness of activity of the gas and smoke protection service of the fire and rescue subdivisions, development of methodology of its calculation.

Methodology. On the basis of the calculation methodology of the economic cost of mortality, sick rate and invalidization of the population the calculation methodology of the averted harm due to the human rescue in a fire has been developed.

Results. The calculation methodology of the cost-effectiveness of the activity of the fire and rescue subdivisions has been obtained as well as that one of the gas and smoke protection service.

Scientific novelty. In the work the method for calculation of the damage due to the loss of life and traumatizing of people in a fire has been applied during determination of the virtual profit from the human rescue.

Practical value. The methodology has been applied for the calculation of the cost-effectiveness of the activity of the gas and smoke protection service of the MChS DPR in the years 2017...2018.

Keywords: *damage; social harm; averted harm; death toll; gas and smoke protection service; cost-effectiveness.*

УДК 614.894.7:001.891.572

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

e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-03

Андрей Петрович Кирьян, заместитель начальника академии; e-mail: andrei-kiryan@mail.ru

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Академия гражданской защиты» МЧС ДНР

283050, Донецк, ул. Розы Люксембург, 34а. Тел. (+38 062) 303-27-01

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В РЕГЕНЕРАТИВНОМ ПАТРОНЕ РЕСПИРАТОРА С ХИМИЧЕСКИ СВЯЗАННЫМ КИСЛОРОДОМ

Цель. Разработка математической модели процесса теплообмена в регенеративном патроне респиратора с химически связанным кислородом для исследования возможного увеличения ресурса его защитного действия.

Методика. Математическое моделирование процесса теплопереноса при движении воздушной смеси через регенеративный патрон с радиальным направлением и расположением кислородсодержащего продукта в сегментах.

Результаты. Теоретически подтверждена возможность снижения уровня «спекания» кислородсодержащего вещества и увеличения времени защитного действия регенеративного патрона респиратора с химически связанным кислородом.

Научная новизна. Впервые разработана математическая модель теплообменных процессов в регенеративном патроне с радиальным направлением движения воздушной смеси, которая позволяет установить различие в протекании регенеративных процессов в зависимости от направления движения воздушного потока.

Практическая значимость. Изменение направления движения газовой смеси от большего диаметра регенеративного патрона к меньшему позволяет увеличить время защитного действия респираторов с химически связанным кислородом, предотвращая процесс «спекания» кислородсодержащего продукта, а также оценить возможность уменьшения количества данного продукта при нормированном ресурсе работы респиратора.

Ключевые слова: защита органов дыхания; респиратор; химически связанный кислород; регенерация; теплоперенос; время защитного действия; ресурс.

Постановка проблемы и анализ последних исследований. Важнейший этап разработки технологических систем – построение математической модели процесса, на базе которой формируют критерии качества и ограничения, выбирают структуру и параметры проекта системы, технические средства реализации. Основным фактор, определяющий полноту и точность математической модели, – цель моделирования.

Существует два основных метода построения математических моделей:

- разработка модели на базе физических законов протекания процессов, в частности законов тепломассопереноса;
- экспериментально-статистические методы построения модели.

Экспериментально-статистические методы сводятся к построению значимой (импульсной переходной) функции объекта, которая полностью определяет его

статистические и динамические свойства [1]. С учетом экспериментальных данных, полученных в процессе нормального функционирования объекта, определяют значимость функций различных одномерных каналов типа «температура нагревающей среды в зоне», «температура материала на выходе из зоны» и т.д.

Экспериментально-статистический метод построения моделей обладает рядом недостатков: требует большого количества труднодоступной информации о процессе, получаемые модели работают лишь в узком диапазоне изменения параметров. В силу указанных недостатков экспериментально-статистический метод не нашел широкого использования на практике.

При математическом моделировании процессов тепломассопереноса более удобный в инженерном отношении и универсальный метод построения, базирующийся на физических законах, которые сводятся к следующим этапам:

- обоснование и выбор структуры математической модели на основании физических соображений и целей моделирования;
- оценивание параметров модели по имеющимся данным о процессе;
- проверка адекватности математической модели реальному процессу.

Основные уравнения, используемые для построения моделей, представляют собой частный случай системы Навье – Стокса:

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = - \frac{dP}{dx} + \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0, \end{array} \right. \quad (2)$$

где ρ – плотность вещества, кг/м³;
 μ – коэффициент вязкости, Н·с/м²;
 P – давление, Н/м²;
 $u=u(x,y)$, $v=v(x,y)$ – компоненты вектора скорости

$$\vec{w} = \vec{i}u + \vec{j}v.$$

Математические модели, описывающие сложные технологические процессы, как правило, преобразовывают к безразмерному виду, что позволяет проводить исследования численными методами с использованием компьютерной техники.

Введем характерные параметры:

l – характерный размер, м;

V – характерная скорость, м/с.

Примем безразмерные величины:

$$x' = \frac{x}{l}; \quad y' = \frac{y}{l}; \quad u' = \frac{u}{V}; \quad v' = \frac{v}{V}.$$

Тогда система уравнений (1) – (2) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho \left(\frac{V^2}{l} u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{V^2}{l} v' \frac{\partial u'}{\partial y'} \right) = -\frac{1}{l} \frac{dP}{dx'} + \frac{V}{l^2} \mu \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2}; \\ \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} = 0. \end{array} \right.$$

Уравнение (1) перепишем в виде

$$u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} = -\frac{1}{\rho V^2} \frac{dP}{dx'} + \frac{\mu}{\rho V l} \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2}.$$

Здесь $Re = \rho V l / \mu$ – безразмерный параметр – число Рейнольдса.

Отдельно рассмотрим слагаемое

$$\frac{1}{\rho V^2} \frac{dP}{dx} = \frac{d}{dx} \left(\frac{P}{\rho V^2} \right),$$

где $\rho = const$; $V = const$.

Величина P' – безразмерное давление:

$$P' = P / (\rho V^2).$$

Тогда система (1) – (2) переходит к виду

$$\left\{ \begin{array}{l} u' \frac{\partial u'}{\partial x'} + v' \frac{\partial u'}{\partial y'} = -\frac{dP'}{dx'} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u'}{\partial y'^2}; \\ \frac{\partial u'}{\partial x'} + \frac{\partial v'}{\partial y'} = 0. \end{array} \right. \quad (3)$$

(4)

Дальнейшее преобразование системы (3) – (4) направлено на исключение числа Рейнольдса. Введем переменные

$$v'' = v' \sqrt{Re}; \quad y'' = y' \sqrt{Re}.$$

Опустив штрихи возле переменных, получим окончательную систему уравнений (5) – (6):

$$\left\{ \begin{array}{l} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{dP}{dx} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}; \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0. \end{array} \right. \quad (5)$$

(6)

В этой системе все величины безразмерные. Физический смысл уравнения (6) состоит в том, что внутри области источники и стоки отсутствуют:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = \operatorname{div} \vec{w} = 0.$$

Массовые силы, т.е. силы тяжести в системе (5) – (6) отсутствуют, так как при движении однородной жидкости ($\rho = \text{const}$) они исключаются из (5).

Цель работы. Создание математической модели процесса теплообмена в регенеративном патроне респиратора с химически связанным кислородом для исследования возможности повышения ресурса его защитного действия.

Материалы и результаты исследований. Рассматриваем распределение температуры в области G при заданном количестве узлов (отверстий) на газораспределительной решетке (рис. 1).

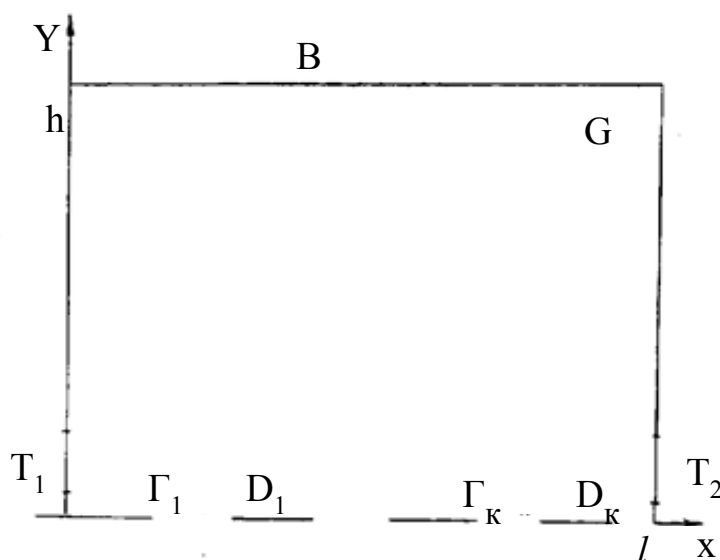


Рис. 1. Обобщённая схема ограниченной сплошной среды в плоском разрезе

Такая задача относится к классу краевых со смешанными краевыми условиями, а само уравнение эллиптического типа.

Дифференциальное уравнение распределения температуры $T(x, y)$ и краевые условия имеют следующий вид [2]:

$$\omega_{\text{ср}} \frac{\partial T}{\partial x} = k \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \alpha (T - T_s). \quad (7)$$

Краевые условия:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \Big|_{y=h} &= 0 \text{ при } 0 \leq x \leq l; \\ \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \Big|_{x=0} &= 0 \text{ при } 0 \leq y \leq h \quad \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} \Big|_{x=l} = 0; \\ \frac{\partial T(x,y)}{\partial y} &= 0 \text{ при } (x,y) \in \Gamma_K; \\ T(x,y) &= T_C \text{ при } (x,y) \in D_K, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где T_C – температура поступающего воздуха, К;

C – удельная теплоемкость сплошной среды, Дж/(кг·К);

ρ – плотность среды, кг/м³;

ω – скорость поступающего воздуха, м/с;

k – коэффициент теплопроводности среды, Вт/(м·К);

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

T_s – температура внешнего слоя (окружающей среды), К.

Для решения полученной краевой задачи (7) – (8) сведем ее к безразмерному виду, когда $0 \leq x \leq 1$; $0 \leq y \leq 1$. Полученную в результате сеточной аппроксимации систему линейных алгебраических уравнений решают методом матричной прогонки.

Алгоритм численного решения строится на основании следующих допущений.

Введем сетку $x_i \times y_j$:

$$\begin{aligned} x_i &= i\Delta x; \quad i = 0, 1, \dots, M; \quad M\Delta x = l; \\ y_j &= j\Delta y; \quad j = 0, 1, \dots, N; \quad N\Delta y = h. \end{aligned}$$

Обозначим: $T_{ij} = T(x_i, y_j)$; $\omega \rho = \gamma$; $\alpha(T - T_s) = f(T)$.

Неявная схема аппроксимации:

$$\begin{aligned} \gamma \frac{T_{i+1,j} - T_{i-1,j}}{2\Delta x} &= k \frac{T_{i+1,j} - 2T_{i,j} + T_{i-1,j}}{\Delta x^2} + \\ &+ k \frac{T_{i,j+1} - 2T_{i,j} + T_{i,j-1}}{\Delta y^2} + f(T_{i,j}). \end{aligned}$$

В результате реализации алгоритма численного решения данной задачи на ЭВМ разработана программа, позволяющая рассчитывать распределение температуры в сечении регенеративного патрона.

Результаты решения задачи в безразмерном виде, а также качественная картина процесса распределения температуры в плоскости осевого сечения Ox при двух фиксированных значениях координаты y приведены на рис. 2. При $y = 0$ распределение температуры на поверхности регенеративного патрона респиратора и локальные максимумы наблюдаются в точках, соответствующих источникам теплоты, при удалении от поверхности (кривая, соответствующая безразмерному значению $y = 0,1$) температура регенеративного продукта

становится ниже, что соответствует физике процесса (рассматривается слой материала, более удаленный от источника теплоты).

Анализ результатов свидетельствует о том, что характер кривой при изменении координаты y не изменяется, она имеет выраженные локальные максимумы в тех же точках, изменяется только фактическое значение температуры в сторону уменьшения, что свидетельствует об адекватности модели в качественном аспекте.

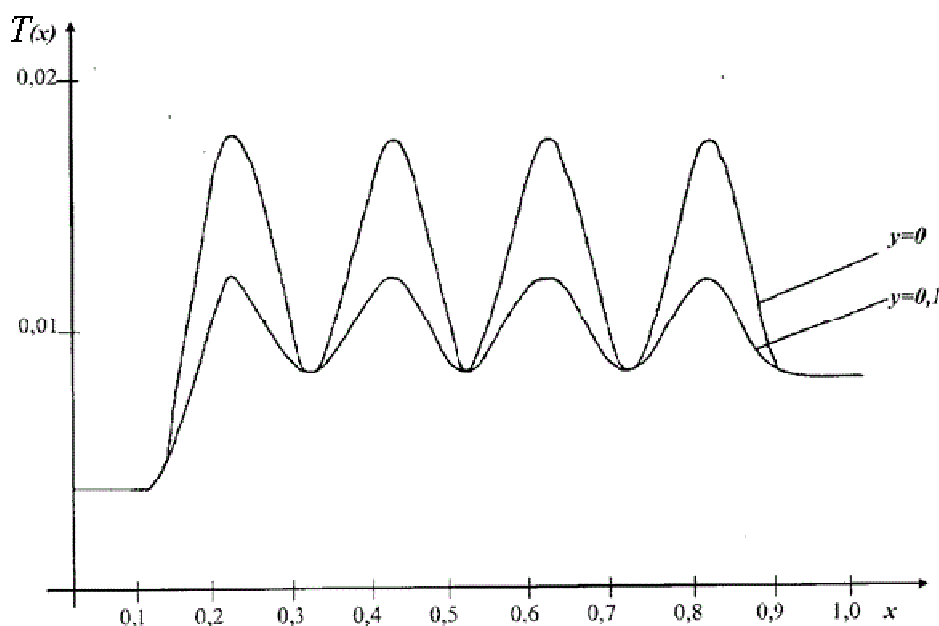


Рис. 2. Зависимость температуры $u(x)$ от направления движения воздуха для $y = 0$; $y = 0,1$ в безразмерных значениях

Таким образом, предложенная математическая модель дает возможность исследовать распределение температуры в зависимости от количества точек поступления теплоты, температуры газов, размеров регенеративного патрона респиратора и обосновывать их рациональные значения при проектировании.

Рассмотренная математическая модель представляет обобщённую постановку процесса теплопереноса и может быть адаптирована к конкретным условиям (в частности, при одном источнике теплоты, наличии дополнительного внешнего воздействия и т.п.).

Выводы. Разработанная детерминированная математическая модель основных процессов теплопереноса в сплошной среде ограниченных размеров позволяет исследовать процесс регенерации как объект с распределёнными параметрами и дает возможность предварительного теоретического прогнозирования «спекания» кислородсодержащего вещества, а также обоснования рациональных технологических параметров при проектировании соответствующих аппаратов с использованием уравнений, адекватно описывающих физические процессы.

Ввиду того что подобные процессы теплопереноса описывают нелинейные уравнения математической физики, их реализация требует применения компьютерных методов для практических расчётов или необходимости выполнить редукцию уравнений.

Список литературы / References

1. Ткаченко, В.Н. Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов: монография / В.Н. Ткаченко – Киев : Наукова думка, 2008. – 243 с.

Tkachenko, V.N. *Matematicheskoye modelirovaniye, identifikatsiya i upravleniye tekhnologicheskimi protsessami teplovoy obrabotki materialov: monografiya* [Mathematical modeling, identification and management of technological processes of material heat treatment: a monograph]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2008, 243 p.

2. Тепломассообмен: монография / С.И. Гинкул, В.И. Шелудченко, В.В. Кравцов, С.В. Палкин. – Донецк : Норд-Пресс, 2006. – 298 с.

Ginkul, S.I., Sheludchenko, V.I., Kravtsov, V.V., Palkin, S.V. *Teplomassoobmen: monografiya* [Heat-mass exchange: a monograph]. Donetsk, Nord-Press Publ., 2006, 298 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук К.Н. Лабинским
Дата поступления рукописи 22.10.2019

Valery Vladimirovich Mamayev, Dr. Sci. (Tech.), deputy director on science;
e-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-03

Andrey Petrovich Kiryan, deputy commander of Academy; e-mail: Andrei-kiryan@mail.ru
The State Educational Institution of Higher Occupational Education “The Civil Defence Academy”
of the EMERCOM of DPR
283050, Donetsk, 34a, ulitsa Rozy Luxemburg. Phone: (+38 062) 303-27-01

MODELING OF PROCESSES IN A REGENERATIVE CARTRIDGE OF A BREATHING APPARATUS, CHEMICAL OXYGEN TYPE

Purpose. Development of a mathematical model of the heat exchange process in the regenerative cartridge of the breathing apparatus, chemical oxygen type, for investigation of the potential enhancement of its protection resource.

Methodology. The mathematical modeling of the heat transfer process during the air mixture movement through the regenerative cartridge with the radial direction and arrangement of the oxygen-containing product in segments.

Results. The possibility of reducing the level of “sintering” of the oxygen-containing substance and increasing the duration of the regenerative cartridge of the breathing apparatus, chemical oxygen type, has been theoretically proven.

Scientific novelty. The mathematical model of the heat transfer processes in the regenerative cartridge with the radial direction of the air mixture movement has been developed for the first time that allows determining the difference in behavior of the regenerative processes depending on the direction of the air-flow movement.

Practical value. Changing the direction of the gas-and-air mixture movement from the bigger diameter of the regenerative cartridge to the smaller one allows increasing the duration of the breathing apparatuses, chemical oxygen type, preventing the “sintering” process of the oxygen-containing product as well as evaluating the possibility to reduce the quantity of this product during the standardized service life of the breathing apparatus.

Keywords: protection of respiratory organs; breathing apparatus; chemical oxygen; regeneration; heat transfer; duration; resource.

УДК 622.822.22:622.411.33

Святослав Павлович Греков, д-р техн. наук, гл. науч. сотр.; e-mail: obep.niigd@mail.ru;

Александр Александрович Всякий, науч. сотр.; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru

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

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДИФфуЗИИ В УГЛЯХ ПО ТЕМПУ ИСТЕЧЕНИЯ МЕТАНА

Цель. Определение коэффициентов диффузии в частицах угля на разных стадиях истечения из него метана после обнажения пласта.

Методы. Экспериментальные исследования в лабораторных условиях и обработка результатов аналитических исследований.

Результаты. Получены зависимости скорости истечения метана из угля во времени от момента начала его дегазации, вычислены коэффициенты диффузии на разных этапах дегазации для угля пласта k_5 шахты «Коммунарская».

Научная новизна. Доказана возможность теоретического определения коэффициентов диффузии метана в углях на основе экспериментальных данных кинетики его десорбции из частиц угля разных размеров и марок.

Практическая ценность. Найденные расчетом коэффициенты диффузии метана используют при расчетах склонности углей к самовозгоранию.

Ключевые слова: коэффициент диффузии; инкубационный период; десорбция метана; склонность к самовозгоранию; уголь.

Постановка проблемы и анализ публикаций по теме исследования. При рассмотрении таких газодинамических явлений в шахтах, как внезапные выбросы угля и газа, загазование горных выработок, самовозгорание угля в целиках и его скоплениях, изучают вопросы внутреннего массопереноса и диффузии метана и кислорода в порах угля.

В работе [1] проанализированы методы определения коэффициентов внутренней диффузии, в том числе: прямым путем экспериментальных измерений потока газа через сферическую границу или плоский диск; на основании изотерм адсорбции с использованием теоретической модели процесса диффузии в образцах углей различного размера; с использованием известного в теории хроматографии уравнения Ван-Деемтера. Выполненные с помощью этого метода Б.И. Кошовским с соавторами исследования диффузии кислорода в поры угля использованы в работе [2], апробированы на десятках углей различных марок и получены коэффициенты порядка $1,5 \cdot 10^{-7} \dots 3,5 \cdot 10^{-7}$ м²/с. Эти значения соответствуют лимитирующей роли поверхностного и кнудсеновского (молекулярного) механизма диффузии, характерного для пустот угля, относящихся по классификации М.М. Дубинина к макро- и поверхностным порам.

Найденные коэффициенты диффузии используют при изучении процессов низкотемпературного окисления углей, когда реакция углерода с кислородом

протекает в основном на поверхности частиц угля в открытых порах. Доля этой поверхности изучена в работе [3] и равна 0,003...0,007. Аналогичные значения коэффициентов диффузии газа в фильтрационных каналах получены А.Д. Алексеевым [4] при изучении истечения метана из угля. Согласно его данным выход газа из открытых пор угля длится от долей до нескольких секунд после отделения его от пласта и в зависимости от размера частиц может составлять до 25 % от общей объемной доли в угле.

Дальнейшее истечение газа происходит за счет его десорбции со стенок открытых пор, диффузии из закрытых пор, которые на несколько порядков меньше. Автор [4] предлагает для описания этого процесса использовать комбинацию двух экспоненциальных зависимостей, нашел их вид для углей разных марок, диаметров частиц и дал интерпретацию их физического смысла. Результаты получены на основании изучения фазового состояния метана в угле, описанного в работе [5].

Математическое описание процесса истечения метана из угля имеет существенное значение для нахождения времени его окончания и освобождения химически активных центров для начала процесса окисления угля, так как от этого зависит инкубационный период самовозгорания. К сожалению, эмпирический характер кривых во многом ограничивает их использование и не отражает физической сущности процесса.

Цель работы. Определение коэффициентов диффузии в частицах угля, отторгнутого от массива, на разных стадиях истечения метана.

Результаты исследования. Аналитическая модель процесса диффузии, сопровождаемая адсорбцией и химическими реакциями, предложена д-ром физико-математических наук А.А. Березовским, опубликована в трудах ИМ АН УССР в 1998 г. и проанализирована с использованием некоторых экспериментальных данных в работе [6].

В постановке А.А. Березовского полагалось, что в произвольном куске угля, занимающем область Ω , первоначально содержится адсорбированный метан с начальной концентрацией S_0 . При его отторжении от массива происходит выделение метана, когда связанное вещество переходит в свободное для диффузии состояние и по системе пор освобождается из частиц угля размером R .

Для случая истечения метана из частиц малых фракций ограничились рассмотрением средних по объему угля Ω концентраций свободного для диффузии газа $\bar{C}(\tau)$ и связанного $\bar{S}(\tau)$.

Сформулированная задача решена аналитически и имеет вид

$$\frac{Q(\tau)}{Q_0} = 1 - \frac{e^{-\mu\tau}}{1 - \mu / \delta} = 1 - \frac{e^{-\mu\tau}}{1 - \mu R^2 / (3D)}, \quad (1)$$

где $Q(\tau)$, Q_0 – текущее и начальное выделение метана, моль/м³;
 μ – скорость выделения метана, с⁻¹;
 τ – время, с;

$$\delta = 3\beta / R, \text{ с}^{-1};$$

β – коэффициент массоотдачи, м/с, равный D/R ;

D – коэффициент диффузии, м²/с.

Из уравнения (1) получено выражение для D в виде

$$D = \mu R^2 / \left\{ 3 \left[1 - e^{-\mu\tau} / \left(1 - \frac{Q(\tau)}{Q_0} \right) \right] \right\}. \quad (2)$$

Из уравнения (2) следует, что коэффициенты диффузии D по мере истечения метана из частиц угля заданного размера R зависят от скорости его истечения μ в момент времени τ (в разные фазы десорбции). Параметр μ является характеристикой конкретного типа угля и может быть определен экспериментально в опытах по истечению метана из частиц насыщенного им угля.

Лабораторные исследования истечения метана из углей выполнены на установке, описанной в статье [7], и включали три этапа: 1-й – насыщение угля метаном, сжатым до нескольких десятков атмосфер; 2-й – сброс сжатого газа из контейнера с углем после его насыщения; 3-й – измерение объема выделяющегося из угля метана за время $\tau_{i+1} - \tau_i$. Частота измерений по мере снижения скорости выделения метана менялась, начиная от 10 мин до нескольких часов.

Во всех экспериментах использовали уголь со средним размером частиц $R = 0,001875$ м массой до 1000 г, помещенный в контейнер, куда подавали сжатый метан под давлением (13 ± 1) МПа. Насыщение угля метаном длилось 10 сут и более до тех пор, пока после перекрытия магистрали высокого давления давление в контейнере переставало снижаться. Подготовленный таким образом уголь в течение 10 мин перегружался в лабораторную установку, и начинались измерения параметров истечения из него метана.

Результаты исследований десорбции метана из угля пласта k_5 шахты «Коммунарская», проведенных НИИГД «Респиратор», изображены графически (кривая 1 на рис. 1, из частиц угля радиусом $R = 0,001875$ м с разбивкой времени по периодам).

Начальное истечение метана (нулевой период на рис. 1 не показан) после сброса в контейнере давления происходит из открытых пор, сообщающихся с атмосферой, и длится от долей до нескольких секунд и не улавливается. Коэффициент диффузии, как было сказано выше, найден хроматографическим методом и равнялся $10^{-7} \dots 10^{-8}$ м²/с.

Первый период 10 мин ... 3,2 ч – по общепринятой классификации десорбция и диффузия метана из открытых макропор – как следует из рис. 1, характеризуется наиболее интенсивным выделением метана.

Второй период 3,2...15,3 ч – диффузия метана из пуазейлевских пор – характеризуется резким снижением скорости выделения метана.

Третий период 15,3...72 ч – диффузия метана в броуновских порах – характеризуется постепенным снижением выделения метана до значений, позволивших их измерить используемым способом.

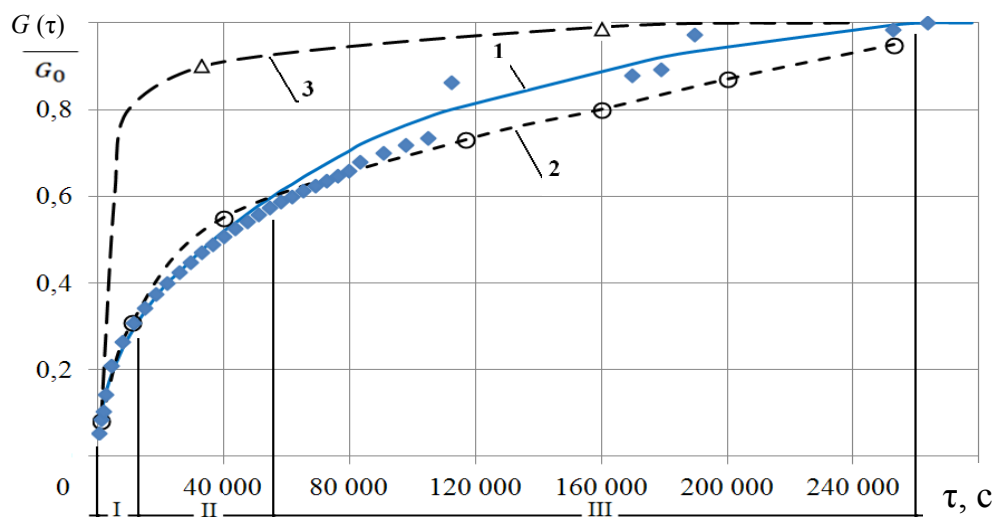


Рис. 1. Экспериментальные (кривая 1) и теоретические (кривая 2) данные НИИГД истечения метана из частиц угля радиусом $R = 0,001875$ м; экспериментальные данные автора [4] для угля марки Т₁ $R = 0,00125$ м (кривая 3)

Согласно экспериментальным данным рассчитана средняя скорость выделения метана по периодам, которая представлена на рис. 2.

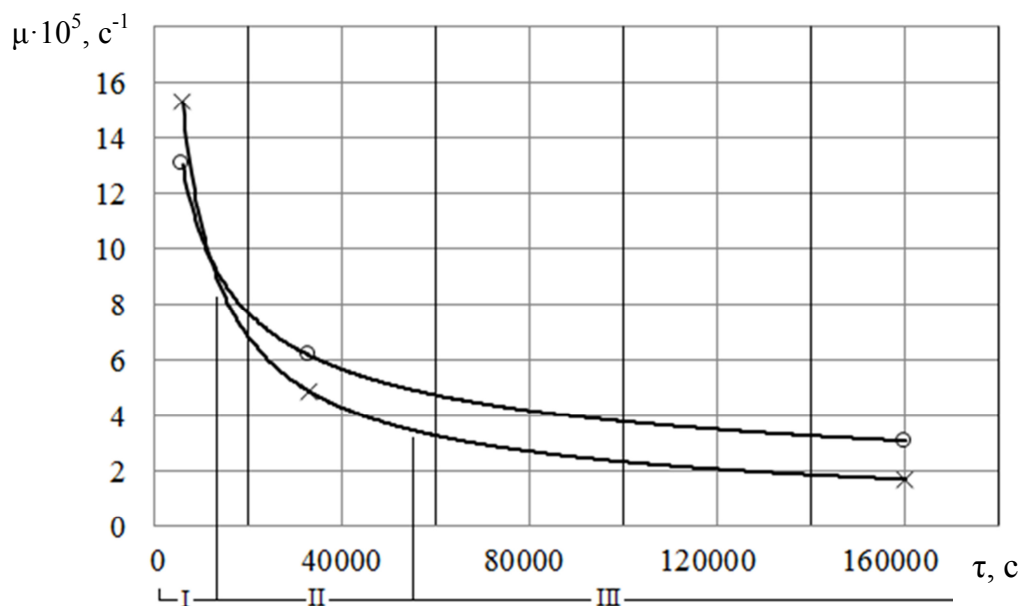


Рис. 2. Средняя скорость истечения метана в различные периоды дегазации пласта k_5 шахты «Коммунарская»: × – из частиц $R = 0,001875$ м по эксперименту НИИГД «Респиратор»; о – из частиц $R = 0,00125$ м по данным [4]

Зависимость μ от времени для принятого в эксперименте угля хорошо аппроксимируется функцией

$$\mu = 0,052(\tau + 1)^{-0,67}. \quad (3)$$

С использованием уравнения (3) были вычислены коэффициенты диффузии по формуле (2), представленные для удобства в логарифмическом виде на рис. 3.

Изменение коэффициентов диффузии во времени в различные периоды истечения метана из частиц угля радиуса $R = 0,001875$ м хорошо описывает для нулевого, первого и второго периодов зависимость

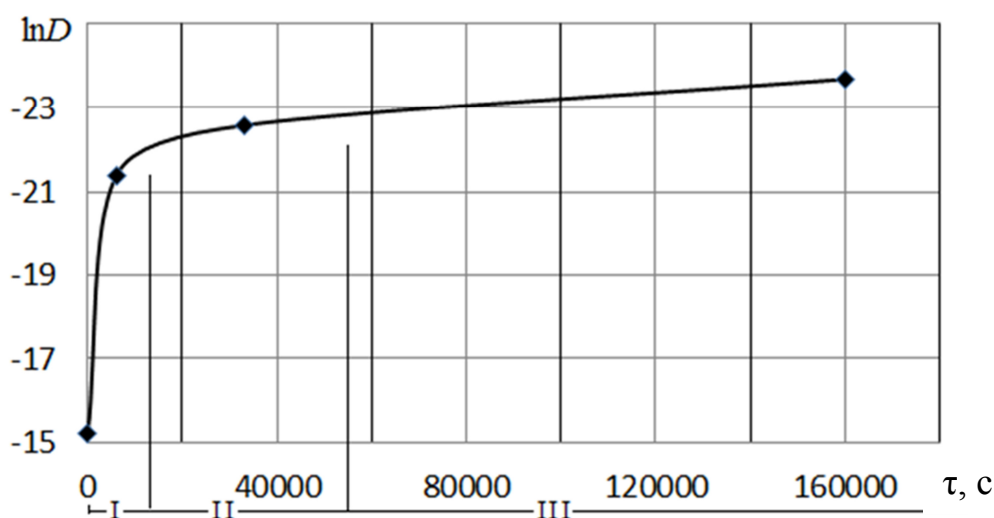


Рис. 3. Зависимость коэффициентов диффузии от времени в различные периоды истечения метана из угля пласта k_5 шахты «Коммунарская»

$$\ln D = \exp[-15,3 - 0,7 \ln(\tau + 1)]. \quad (4)$$

Таким образом, из анализа данных об истечении метана из частиц угля следует, что, имея экспериментальные значения скорости истечения метана, можно по предложенной теоретической зависимости вычислять коэффициент диффузии для разных периодов дегазации угля, соответствующих общепринятым понятиям о его структуре и пористости.

Для подтверждения результатов воспользуемся экспериментальными данными автора [4] об углях разной степени метаморфизма, используя эксперимент с углем марки Т₁, наиболее соответствующий полученным данным об угле пласта k_5 . Учтем при этом, что уголь каждого пласта имеет собственную индивидуальную неповторимую характеристику и с углем, по мнению упомянутого автора, имеет лишь приблизительно общую марку, в связи с чем в форме кривых десорбции возможно некоторое их несовпадение, но общий характер и близкие значения параметров десорбции в изучаемые их периоды для данного размера частиц.

Экспериментальная кривая 2 (см. рис. 1) [4] описывается эмпирической зависимостью

$$\frac{Q(\tau)}{Q_0} = a \left[1 - \exp\left(-\tau / \tau_1^{\text{дес}}\right) \right] + b \left[1 - \exp\left(-\tau / \tau_2^{\text{дес}}\right) \right], \quad (5)$$

где $\tau_1^{\text{дес}} = 34,77$ мин; $a = 0,482$; $\tau_2^{\text{дес}} = 200,69$ мин; $b = 0,512$.

Величина $\tau_1^{\text{дес}}$ трактуется как время выхода газа из приповерхностного слоя гранул угля, когда высокий начальный градиент концентраций метана уменьшается при десорбции в основном за счет смещения максимума концентраций к центру. Значение $\tau_2^{\text{дес}}$ трактуется автором как время десорбции в заключительной фазе; оно непосредственно зависит от размера гранул угля.

Предложенная зависимость (1) получена теоретически на основании физических представлений десорбции и истечения газа из гранул угля и является общей для гранул любых размеров. С ее помощью может быть найден коэффициент диффузии не только для разных типов углей, но и разных пор в них, начиная от открытых приповерхностных и далее в глубь материала до закрытых пор.

Для нахождения параметров скорости истечения метана, коэффициентов диффузии и описания кинетики метановыделения из частиц других диаметров (не исследованных в НИИГД) воспользуемся литературными данными [4] для радиуса частиц $0,000125$ м и близкого по свойствам угля пласта марки Т₁. Используем кривую 3 истечения метана из предварительно насыщенного им угля (см. рис. 1). Согласно математическому описанию его истечения (1) динамика метановыделения зависит от двух параметров: μ и $\delta = 3D / R^2$. Моделируя процесс метановыделения по этим двум параметрам для используемого автором работы [4] диаметра частиц $2...2,5$ мм, выяснилось, что он зависит в основном от скорости истечения метана μ , а коэффициент диффузии для одного и того же угля в изученном диапазоне диаметра его частиц от 2 до $0,25$ мм практически постоянен.

Теоретическая кривая истечения метана из угля (3), построенная по найденным значениям μ для разных периодов его десорбции из частиц угля, и экспериментальные данные автора работы [4] приведены на рис. 1, а значения μ , радиусов частиц и средних значений времени для каждого периода приведены в таблице.

Параметры истечения метана из частиц угля разных размеров

Параметры	Периоды					
	I		II		III	
$R \cdot 10^3, \text{ м}$	0,112	1,12	0,112	1,12	0,112	1,12
$\mu \cdot 10^5, \text{ с}^{-1}$	14,6	5,3	6,8	2,46	3,4	0,4
$\tau \cdot 10^4, \text{ с}$	0,5760	0,5760	3,3	3,3	16	16

Зависимость скорости истечения метана μ из частиц угля $R = 0,000112$ м описывается кривой

$$\mu = \frac{0,0066}{\tau^{0,44}}. \quad (6)$$

Выводы. Предложенная теоретическая зависимость истечения метана из углей и выполненные эксперименты, а также использование литературных данных позволили установить, что на основании результатов наблюдений по истечению метана можно определять коэффициенты диффузии в нем для различных периодов времени дегазации.

Список литературы / References

1. Пашковский, П.С. Расчет коэффициентов диффузии в углях с использованием хроматографического метода / П.С. Пашковский, С.П. Греков, Т.Г. Салахутдинов // Горноспасательное дело: сб. науч. тр. / НИИГД «Респиратор». – 2014. – Вып. 51. – С. 78 – 87.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Salakhutdinov, T.G. *Raschyet koeffitsiyentov diffuzii v ugle s ispol'zovaniyem khromatograficheskogo metoda* [Calculation of the diffusion coefficients in coal with the use of the chromatographic method]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2014, issue 51, pp. 78 – 87.

2. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж, 2013. – 791 с.

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

3. Греков, С.П. Сорбционные процессы при низкотемпературном окислении углей / С.П., Греков, В.П. Орликова // Научно-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. – Новокузнецк, 2017. – № 3. – С. 398 – 402.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P. *Sorbtsionnyye protsessy pri nizkotemperaturnom okislenii ugley* [Sorptions processes during the low-temperature coal oxidation]. *Naukoyemkiye tekhnologii razrabotki i ispol'zovaniya mineral'nykh resursov: nauch. zhurn.* – High technologies of development and application of mineral resources: scientific journal, Novokuznetsk, 2017, no. 3, pp. 398 – 402.

4. Алексеев, А.Д. Физика угля и горных процессов / А.Д. Алексеев. – Киев: Наук. думка, 2010. – 422 с.

Alekseyev, A.D. *Fizika uglya i gornyykh protsessov* [Physics of coal and mining processes]. Kiev, Naukova dumka Publ., 2010, 422 p.

5. Васильковский, В.А. Фазовые состояния и механизмы десорбции метана из угля / В.А. Васильковский, А.Н. Молчанов, Н.А. Калугина // Физико-технические проблемы горного производства: сб. науч. тр. / Ин-т физики горных процессов НАН Украины. – Донецк, 2006. – № 9. – С. 62 – 70.

Vasil'kovskiy, V.A., Molchanov, A.N., Kalugina, N.A. *Fazovyye sostoyaniya i mekhanizmy desorbtsii metana iz uglya* [Phase states and mechanisms of methane desorption from coal]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy gornogo proizvodstva: sb. nauch. tr. In-t fiziki gornyykh protsessov NAN Ukrainy* [Physicotechnical problems of mining practice: collection of scientific papers. Institute of physics of mining

processes of The National Academy of Sciences of Ukraine]. Donetsk, 2006, no. 9, pp. 62 – 70.

6. Пашковский, П.С. Актуальные вопросы борьбы с самовозгоранием угля / П.С. Пашковский, С.П. Греков, И.Н. Зинченко. – Донецк : Арпи, 2012. – 656 с.

Pashkovskiy, P.S., Grekov, S.P., Zinchenko, I.N. *Aktual'nyye voprosy bor'by s samovozgoraniyem uglya* [Actual questions of fighting the spontaneous combustion of coal]. Donetsk, Arpi Publ., 2012, 656 p.

7. Греков, С.П. Охлаждение угля за счет дросселирования выделяющегося метана / С.П. Греков, В.П. Орликова, А.А. Всякий // Горноспасательное дело: сб. науч. ст. – 2013. – Вып. 50. – С. 97 – 106.

Grekov, S.P., Orlikova, V.P., Vsyakiy, A.A. *Okhlazhdeniye uglya za schyet drosselirovaniya vydelyayushchegosya metana* [Cooling of coal due to released methane throttling]. *Gornospasatel'noye delo: sb. nauch. tr. / NIIGD "Respirator"* [Proc. of the NIIGD "Respirator" "Mine-rescue work"]. Donetsk, 2013, issue 50, pp. 96 – 106.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 22.10.2019

Svyatoslav Pavlovich Grekov, Dr. Sci. (Tech.), senior research scientist; e-mail: obep.niigd@mail.ru;

Aleksandr Aleksandrovich Vsyakiy, scientific associate; e-mail: sentyabr.eger@inbox.ru

The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

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

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL DETERMINATION OF DIFFUSION COEFFICIENTS IN COAL BY METHANE RELEASE RATE

Purpose. Determination of the diffusion coefficients in the particles of coal at the different stages of the methane release from it after the seam outcrop.

Methodology. Experimental investigations in the laboratory conditions and processing of the results of the analytical investigations.

Results. The dependences of the velocity of the methane release from coal during the time from the beginning of its degassing have been obtained, the diffusion coefficients at different stages of degassing have been calculated for coal of the k5 seam of the "Kommunarskaya" coal mine.

Scientific novelty. The possibility of the theoretical determination of the methane diffusion coefficients in coal on the basis of the experimental data of kinetics of the methane desorption from the coal particles of different sizes and ranks has been proven.

Practical value. The methane diffusion coefficients obtained by the calculation are used in the calculations of coal liability to spontaneous combustion.

Keywords: *diffusion coefficient; incubation period; methane desorption; liability to spontaneous combustion.*

УДК 622.822.7:614.842.621

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

Николай Александрович Галухин, науч. сотр.; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru;

Дмитрий Аркадьевич Мозалевский, инж.; e-mail: mozalevskiy.d@yandex.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-36

ПАРАМЕТРЫ СРЕДСТВ ЗАБОРА ВОДЫ ИЗ ПОЖАРНО-ОРОСИТЕЛЬНОГО ТРУБОПРОВОДА

Цель. Расчет расходной характеристики, параметров сверления трубопровода, герметичности уплотнения, запаса прочности крюка.

Методы. Аналитические методы расчета параметров сверления трубопровода, герметичности уплотнения между средством забора воды и трубопроводом, запаса прочности крюка, аналитические и экспериментальные методы расчета расходной характеристики.

Результаты. Получены численные значения осевой силы резания сверла, крутящего момента сверла, контактного давления на уплотнитель, запаса прочности крюка, расходной характеристики системы «ствол – пожарный рукав – средство забора воды».

Научная новизна. Показано, что условия компактности и минимальной массы средства забора воды из пожарно-оросительного трубопровода не позволяют аналитически рассчитать расходную характеристику системы «ствол – пожарный рукав – средство забора воды» из-за взаимовлияния местных сопротивлений. Предложено суммарную расходную характеристику «ствол – пожарный рукав – средство забора воды» находить аналитически, а расходную характеристику проточной части средства забора воды – экспериментально. При этом расходную характеристику системы «ствол – пожарный рукав – средство забора воды» предложено находить путем суммирования расходных характеристик, полученных аналитическим и экспериментальным путем.

Практическая значимость. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования средств забора воды.

Ключевые слова: *средство забора воды; трубопровод; расчет параметров резания; расходная характеристика; запас прочности крюка.*

Постановка проблемы. При ведении горноспасательных работ, связанных с ликвидацией пожаров в горных выработках угольных шахт, возникает необходимость в оперативном подключении пожарных рукавов к пожарно-оросительному трубопроводу в произвольном (необорудованном отводом) месте для немедленной подачи воды в очаг возгорания. С этой целью подразделения ГВГСС укомплектованы специальными техническими средствами забора воды из пожарно-оросительного трубопровода. В результате проведенного обследования установлено, что на оснащении ОГВГСО находятся следующие средства забора воды:

- гидрант-пистолет ГП-3;
- промежуточное соединение с гидроредуктором РГ-2;
- устройство ОСА.

Гидрант-пистолет ГП-3 ограничен в применении, поскольку вспышка пороховых газов – источник воспламенения в шахтах, опасных по газу и пыли.

Кроме того, существуют и другие недостатки: нарушение герметичности фланцевых соединений труб из-за гидравлического удара, сопровождающего вскрытие трубопровода пробойником, нарушение герметичности старых корродированных труб из-за утончения стенок. Диаметр пробиваемого отверстия, равный 25 мм, меньше соответствующего диаметра отверстия, получаемого при вскрытии с помощью механического средства забора воды, что уменьшает подачу воды к очагу пожара.

Промежуточное соединение с гидроредуктором РГ-2 имеет большую массу, превышающую 20 кг, и неудобно при ручном транспортировании по горным выработкам, поэтому (по данным ОГВГСО) применяется редко.

Устройство ОСА массой 9 кг – основное средство забора воды при оперативном вскрытии трубопровода. Однако анализ технического состояния выявил ряд недостатков, связанных с конструктивным исполнением устройства ОСА: быстрое затупление режущих кромок сверла и ненадежная фиксация устройства на трубопроводе.

В связи с этим возникает необходимость в его усовершенствовании.

Для решения этой задачи необходимо:

- определить расходные характеристики средства забора воды;
- исследовать режим резания, действующее усилие на сверле и момент силы на рукоятке;
- исследовать условия герметичности стыковки средства забора воды с трубопроводом;
- обосновать применение крюков для натяжения цепи и определить запас прочности.

Анализ последних исследований. Особенность современного состояния [1–4] средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода – разнообразие технических решений, ориентированных на выполнение конкретной прикладной задачи. Большинство технических решений средств забора воды из действующих трубопроводов разработано для общепромышленного применения без специальных требований, связанных с взрывоопасностью окружающей среды. Это позволяет сократить время монтажа средств забора воды и механизировать операции по вырезанию отверстий в трубопроводе. В частности, в большинстве известных технических решений общепромышленных средств забора воды применяют способ соединения отвода с действующим трубопроводом с помощью сварки. Жесткое соединение без дополнительного уплотнения позволяет монтировать на отводе режущий инструмент с приводами вращения и подачи.

Для сокращения времени работы и устранения ручного труда по вырезанию отверстия широко применяют электроприводы, снабженные редукторами.

Недостатки общепромышленных средств забора воды из действующих трубопроводов – сложность конструкции и большая масса из-за применения редукторов и электродвигателей в механизмах вращения и подачи режущего инструмента.

Для проведения ремонтных и горноспасательных работ в угольных шахтах, опасных по газу, разработано водо- и газозаборное устройство, в работе которого

использован механический принцип сверления отверстия в стенке пожарно-оросительного трубопровода. Особо подчеркивается основное преимущество устройства – совмещение приводов вращательного и поступательного движения режущего инструмента (сверла) одной приводной рукояткой вращательного движения. Одновременное вращение режущего инструмента и его дискретная осевая подача на фиксированное расстояние за один оборот (0,2 мм) обеспечено за счет применения двуплечего рычага для управления зубчатой муфтой. Одно из плеч двуплечего рычага снабжено роликом, который при накатывании на секторный кулачок вводит в зацепление две зубчатые полумуфты и, таким образом, осуществляют осевую подачу на фиксированное расстояние одновременно с вращением режущего инструмента.

Цель исследования – расчет основных параметров средств забора воды из пожарно-оросительного трубопровода.

Материалы и результаты исследований. К основным параметрам средств забора воды относятся: расходная характеристика, осевая сила резания, крутящий момент на рукоятке, герметичность уплотнения между средством забора воды и трубопроводом, прочность крюка натяжения.

Расходную характеристику системы «ствол – рукав – средство забора воды» находим путем суммирования расходных характеристик каждой составляющей системы.

Потери давления в стволе $\Delta P_{\text{ст}}$, Па, определяем по формуле

$$\Delta P_{\text{ст}} = \rho g S_{\text{ст}} Q^2, \quad (1)$$

где ρ – плотность воды, кг/м³;
 g – ускорение свободного падения, м/с²;
 $S_{\text{ст}}$ – сопротивление ствола, с²/м⁵;
 Q – расход воды, м³/с.

Для ствола с диаметром насадка 19 мм согласно [5] $S_{\text{ст}} = 0,634 \cdot 10^6$ с²/м⁵. Поскольку расходная характеристика гидравлических устройств подчиняется квадратичной зависимости, то для построения графика достаточно найти потери давления в трех точках, например при расходах 2,50 (2,50·10⁻³ м³/с), 3,33 (3,33·10⁻³ м³/с) и 4,10 дм³/с (4,10·10⁻³ м³/с). Подставляя данные в формулу (1) при $Q = 2,50 \cdot 10^{-3}$; $3,33 \cdot 10^{-3}$ и $4,10 \cdot 10^{-3}$ м³/с, получаем соответствующие значения давления $\Delta P_{\text{ст}}$, равные 38872,13; 68967,86 и 104550,47 Па.

Потери давления ΔP_p , Па, в рукавах определяем по формуле

$$\Delta P_p = \rho g S Q^2 n,$$

где S – сопротивление рукава, с²/м⁵;
 n – количество рукавов.

Согласно [6] для прорезиненного рукава диаметром 66 мм $S = 0,035 \cdot 10^6 \text{ с}^2/\text{м}^5$. Расчеты при $n = 2$ и $Q = 2,50 \cdot 10^{-3}$; $3,33 \cdot 10^{-3}$ и $4,10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ дают следующие значения потерь давления в рукавах $\Delta P_p = 4291,88$; $7614,75$ и $1154,43 \text{ Па}$.

Суммарные потери давления ΔP , Па, на рукавной линии, соединенной со стволом, определяем по формуле

$$\Delta P = \Delta P_p + \Delta P_{\text{ст}} = \rho g Q^2 (n S + S_{\text{ст}}). \quad (2)$$

Используя формулу (2) и ранее найденные потери давления на стволе и в рукавах, строим график расходной характеристики рукавной линии со стволом (рис. 1).

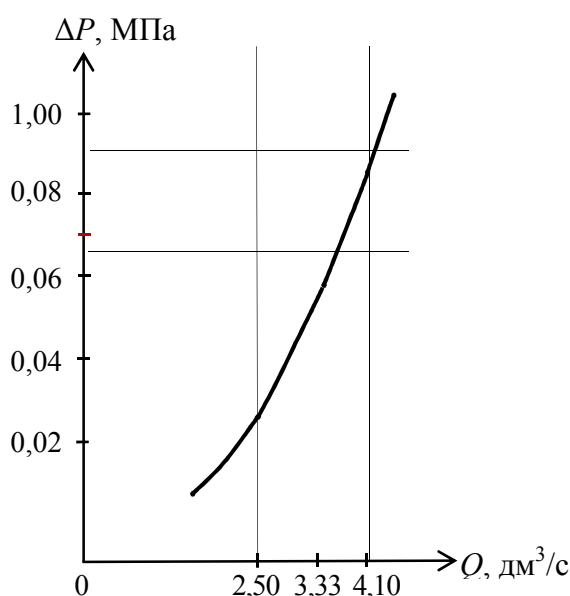


Рис. 1. Расходная характеристика рукавной линии со стволом

Потери давления в средстве забора воды состоят из местных потерь давления, обусловленных изменением геометрии и потерь по длине каналов проточной части. На рис. 2 представлена проточная часть средства забора воды из пожарно-оросительного трубопровода.

Местные потери давления состоят из потерь давления: на входе из трубопровода в присоединительный патрубок, внезапного расширения потока при переходе от присоединительного патрубка к крану, внезапного сужения потока при переходе от крана к втулке, внезапного расширения потока при переходе от втулки к входному патрубку. Потери давления в каналах проточной части средства забора воды включают потери давления по длине каналов: присоединительного патрубка, крана, втулки, выходного патрубка. Формула для нахождения потерь давления в проточной части средства забора воды имеет вид

$$\Delta P = \rho / 2 \left(\sum_{i=1}^4 \lambda_i \frac{l_i}{d_i} v_i^2 + \sum_{j=1}^4 \xi_j v_j^2 \right), \quad (3)$$

где λ_i – коэффициент сопротивления i -го канала;

l_i – длина i -го канала, м;

d_i – диаметр i -го канала, м;

v_i – средняя скорость потока в i -м канале, м/с;

ξ_j – коэффициент потерь в j -м местном сопротивлении;

v_j – средняя скорость потока до или после j -го местного сопротивления (в зависимости от условий, при которых определяется коэффициент потерь ξ_j), м/с.

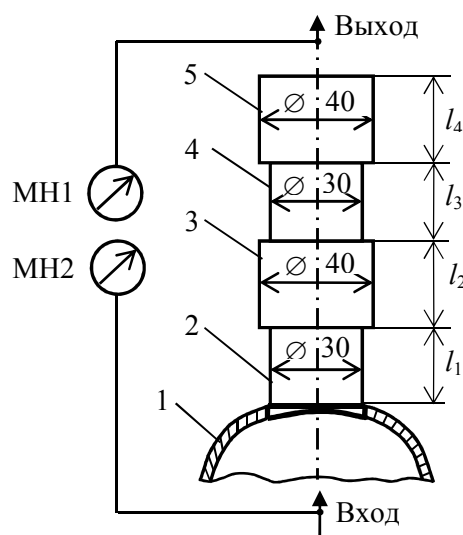


Рис. 2. Проточная часть средства забора воды:

1 – трубопровод; 2 – присоединительный патрубок; 3 – кран;
4 – втулка; 5 – выходной патрубок

Условие применения формулы (3) для расчета потерь давления в проточной части средства забора воды – отсутствие взаимного влияния местных сопротивлений. При близко расположенных местных сопротивлениях в результате деформации турбулентного потока (интенсивное перемешивание частиц жидкости, обмен количества движения между ними, вихреобразование) происходит нарушение нормального движения жидкости, а эпюра средней скорости потока не успевает стабилизироваться до входа в следующее местное сопротивление.

Из-за этого принцип аддитивности потерь давления в местных сопротивлениях не дает правильного результата.

Длина участка стабилизации $l_{ст}$, м, потока местного сопротивления, при котором допустимо применение формулы (3), составляет не менее 10 диаметров трубопровода:

$$l_{ст} \geq 10 d.$$

Используя рис. 2 и обозначенные на нем диаметры каналов проточной части средства забора воды, подсчитаем суммарную длину l_{Σ} , м, всех каналов, при которой выполняется неравенство

$$l_{\Sigma} \geq 10 (0,03 + 0,04 + 0,03 + 0,04) = 1,4 \text{ м.} \quad (4)$$

Таким образом, чтобы корректно применить формулу (3) для определения потерь давления на проточной части средства забора воды, его высота должна быть не менее 1,4 м. Очевидно, что необходимое условие (4) для применения формулы (3) не может быть выполнено из-за компактности (минимальности массогабаритных характеристик) средства забора воды. Поэтому при взаимодействии местных сопротивлений вся совокупность их и соединяющих каналов рассматривается как одно сложное местное сопротивление, перепад давления на котором определяют экспериментально с помощью манометров (пьезометров, микроманометров) МН1 и МН2 при пропускании через проточную часть расходов воды 9, 12 и 15 м³/ч. По результатам измерений строят графическую зависимость перепада давления от расхода воды проточной части средства забора воды. Полученный таким образом график суммируют с графиком, изображенным на рис. 1, и получают расходную характеристику системы «ствол – пожарный рукав – средство забора воды».

Расходная характеристика позволяет определить расход воды, проходящий через средство забора воды и подаваемый в очаг пожара.

Осевую силу резания сверла P_o , Н, определяют по формуле

$$P_o = q C_p D^{X_p} S^{y_p} K_p, \quad (5)$$

где q – ускорение свободного падения, м/с²;

C_p, X_p, y_p – эмпирические коэффициенты;

S – подача сверла за оборот, мм;

D – диаметр сверла, мм;

K_p – поправочный коэффициент.

Для сверления конструкционной стали с пределом прочности на растяжение $\sigma_B = 700$ МПа сверлом из быстрорежущей стали с условием его заточки принимаем следующие значения справочных коэффициентов [7]:

$$q = 9,81 \text{ м/с}^2; C_p = 68; X_p = 1; y_p = 0,7.$$

Поправочный коэффициент рассчитываем по следующей формуле:

$$K_p = \left(\frac{\sigma_B}{75} \right)^{0,75}.$$

Для трубы, выполненной из стали 35 с, $\sigma_B = 600$ МПа

$$K_p = \left(\frac{60}{75} \right)^{0,75} = 0,85.$$

Подставляя значение K_p и справочные значения коэффициентов q , C_p , X_p , y_p в формулу (5) при диаметре сверла, равном $D = 30$ мм, и подаче сверла $S = 0,15$ мм за один оборот, получаем

$$P_o = 9,81 \cdot 68 \cdot 30 \cdot (0,15)^{0,7} \cdot 0,85 = 4508 \text{ Н.}$$

Крутящий момент $M_{кр}$, Н·м, сверла найдем по формуле

$$M_{кр} = g C_m D^{q_m} S^{y_m}.$$

Согласно [8] справочные коэффициенты $C_m = 0,034$; $q_m = 2$; $y_m = 0,8$, поэтому крутящий момент сверла равен

$$M_{кр} = 9,81 \cdot 0,034 \cdot 30^2 \cdot (0,15)^{0,8} \cdot 0,85 = 55,9 \text{ Н·м.}$$

Принимаем длину рукоятки $L = 0,4$ м, поэтому усилие F , Н, на рукоятке средства забора воды определим из выражения

$$F = \frac{M_{кр}}{L + D / 2}.$$

Подставляя численные значения, находим $F = 134,7$ Н.

Исходные данные для расчета герметичности уплотнения: максимальное давление воды P_{max} , МПа, в пожарно-оросительном трубопроводе и принятое испытательное давление $P_{исп}$, МПа. Для расчета принимаем, что $P_{max} = 3$ МПа, а $P_{исп} = 1,5 P_{max}$. Для обеспечения герметичности необходимо, чтобы давление затяжки уплотнения P_k , МПа (контактное давление), превышало давление внутренней среды в трубе – воды, т.е. чтобы выполнялось следующее неравенство:

$$P_k > P_{исп}.$$

Контактное давление P_k , Па, обеспечивает затяжка двух болтов:

$$P_k = 8N / \left[\pi (D_1^2 - D_2^2) \right], \quad (6)$$

где N – усилие затяжки болта, Н;

D_1, D_2 – внешний и внутренний диаметр уплотнения, м.

Принимаем $D_1 = 92 \cdot 10^{-3}$ м; $D_2 = 62 \cdot 10^{-3}$ м.

Усилие затяжки болта находим по формуле

$$N = M_6 / 0,2 d_6,$$

где M_6 – момент силы, приложенной к болту, Н·м;

d_6 – диаметр болта, м.

При длине ключа 0,26 м и усилии, приложенном человеком к ключу и равном 200 Н, $M_6 = 52$ Н·м. Для болта М14 $d_6 = 0,014$ м, поэтому $N = 18571,4$ Н.

Тогда по формуле (6) определяем контактное давление $P_k = 10,2$ МПа.

Определяем испытательное давление $P_{исп} = 4,5$ МПа. Условие герметичности уплотняемого отверстия трубопровода запишем в виде неравенства $P_k > P_{исп} = 4,5$ МПа.

Для расчета крюка на прочность составляем его расчетную схему (рис. 3).

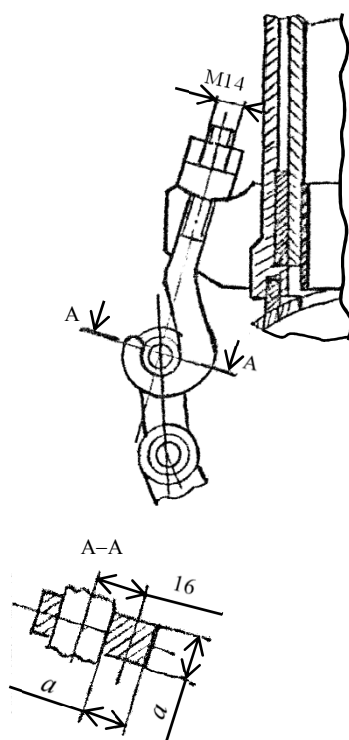


Рис. 3. Расчетная схема крюка

Наибольшие растягивающие напряжения $\sigma_{рmax}$, МПа, возникают в растянутом волокне в сечении А–А:

$$\sigma_{рmax} = \sigma_{изг} + \sigma_p, \quad (7)$$

где $\sigma_{изг}$, σ_p – изгибающие и растягивающие напряжения в сечении А–А, МПа.

$$\sigma_{изг} = N l_k / W_k, \quad (8)$$

где l_k – расстояние от оси болта до нейтрального слоя сечения А–А, м;

W_k – момент сопротивления сечения А–А, м³.

Момент сопротивления квадратного сечения А–А находим по формуле

$$W = a^3 / 6,$$

где $a = 21 \cdot 10^{-3}$ – сторона квадрата, м.

Подставляем исходные данные при $l_k = 16 \cdot 10^{-3}$ м в формулу (8) и получаем $\sigma_{изг} = 192$ МПа.

Растягивающее напряжение находим по формуле

$$\sigma_p = N / S,$$

где S – площадь крюка в сечении А–А, м^2 .

Имеем

$$S = 441 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2,$$

тогда

$$\sigma_p = 42 \text{ МПа}.$$

Зная $\sigma_{изг}$ и σ_p , по формуле (7) находим максимальное растягивающее усилие на крюке:

$$\sigma_{pmax} = 192 + 42 = 234 \text{ МПа}.$$

Если крюк изготовлен из стали 45, то $[\sigma_m] = 420$ МПа, а запас прочности по пределу текучести n_τ равен

$$n_\tau = [\sigma_m] / \sigma_{pmax}.$$

Подставляя данные, имеем $n_\tau = 420/234 = 1,79$.

Так как $n_\tau > 1$, то прочность крюка обеспечена.

Выводы. Показано, что расходная характеристика не может быть определена аналитически из-за требований компактности (минимальности массогабаритных параметров) средства забора воды. Учет взаимовлияния местных сопротивлений проточной части должен учитываться экспериментальным путем.

Рассчитанные силовые параметры резания сверла при рекомендуемом диаметре сверла, равном 30 мм, и подаче сверла, равной 0,15 мм, являются рациональными, не превышающими эргонометрическую норму 250 Н на рукоятке.

Герметичность средства забора воды обеспечивает контактное давление уплотнителя при приложении усилия к рукоятке ключа 200 Н. Запас по прочности крюка, равный 1,79, обеспечивает надежное крепление средства забора воды к пожарно-оросительному трубопроводу.

Список литературы / References

1. Пат. 2147975 Российская Федерация, МПК F 16 L 41/04, В 23 В 41/08.
Устройство для вырезки отверстий в действующем трубопроводе / С.М. Гладков, В.В. Клабуков, А.Х. Исмагилов [Электронный ресурс]. URL: <https://findpatent.ru/patent/214/2147975.html> (дата обращения: 29.11.2019).
Gladkov, S.M., Klabukov, V.V., Ismagilov, A.Kh. *Ustroystvo dlya vyrezki otverstiy v deystvuyushchem truboprovode* [Device for cutting holes in an active pipeline]. Patent RF, no. 2147975. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <https://findpatent.ru/patent/214/2147975.html> (accessed: 29.11.2019).
2. Пат. 2170874 Российская Федерация, МПК F 16 L 41/04, В 23 В 1/08.
Устройство для врезки отвода в действующий трубопровод / Г.Н. Курносов, А.В. Проскурин, Г.Г. Шевченко, П.В. Воронков [Электронный ресурс]. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2170874> (дата обращения: 29.11.2019).
Kurnosov, G.N., Proskurin, A.V., Shevchenko, G.G., Voronkov, P.V. *Ustroystvo dlya vrezki otvoda v deystvuyushchiy truboprovod* [Device for cutting-in an elbow bend into an active pipeline]. Patent RF, no. 2170874. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2170874> (accessed: 29.11.2019).
3. Пат. 2148478 Российская Федерация, МПК F 16 L 41/04, В 23 В 41/08.
Устройство для вырезания отверстия в действующем трубопроводе / И.В. Штин, А.С. Котов, В.В. Васильев [Электронный ресурс]. URL: <http://www.freepatent.ru/patents/2148478> (дата обращения: 29.11.2019).
Shtin, I.V., Kotov, A.S., Vasil'yev, V.V. *Ustroystvo dlya vyrezaniya otverstiya v deystvuyushchem truboprovode* [Device for cutting a hole in an active pipeline]. Patent RF, no. 2148478. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <http://www.freepatent.ru/patents/2148478> (accessed: 29.11.2019).
4. Пат. 2663316 Российская Федерация, МПК F 16 L 41/04, В 23 В 41/08.
Устройство врезки отвода в действующий трубопровод, сменный патрон для него и центратор самоцентрирующийся для установки устройства на трубопровод / А.Р. Янышев, Р.С. Янышев [Электронный ресурс]. URL: <https://findpatent.ru/patent/266/2663316.html> (дата обращения: 29.11.2019).
Yanyshev, A.R., Yanyshev, R.S. *Ustroystvo vrezki otvoda v deystvuyushchiy truboprovod, smennyy patron dlya nego i tsentrator samotsentriruyushchiysya dlya ustanovki ustroystva na truboprovod* [Device for cutting-in an elbow bend into an active pipeline, exchange chuck for it and self-aligning centering skid for installation of the device on the pipeline]. Patent RF, no. 2663316. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <https://findpatent.ru/patent/266/2663316.html> (accessed: 29.11.2019).
5. Качанов, И.В. Сопротивление пожарных стволов / И.В. Качанов, И.В. Карпенчук, А.И. Красовский // Вестн. Белорус. нац. техн. ун-та. – 2010. – № 2. – С. 58 – 63.
Kachanov, I.V., Karpenchuk, I.V., Krasovskiy, A.I. *Soprotivleniye pozharnykh stvolov* [Resistance of fire nozzles]. *Vestnik BNTU – Bulletin of the BNTU*, 2010, no. 2, pp. 58 – 63.

6. Характеристика напорных пожарных рукавов [Электронный ресурс]. URL: <https://sites.google.com/site/normativ2/informacia/harakteristiki-napornyh-pozarnyh-rukavov> (дата обращения: 29.11.2019).

Kharakteristika napornykh pozharnykh rukavov [Characteristic of pressure fire hoses]. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <https://sites.google.com/site/normativ2/informacia/harakteristiki-napornyh-pozarnyh-rukavov> (accessed: 29.11.2019).

7. Резание материалов / С.Н. Григорьев [и др.]. – Пенза: Приволж. Дом знаний, 2012. – 356 с.

Grigoryev, S.N. [et al]. *Rezaniye materialov* [Cutting the materials]. Penza, Privolzh. Dom znaniy Publ., 2012, 356 p.

8. Основы технологии машиностроения [Электронный ресурс]. URL: www.ostm.ru/cp_xp_up_pr.html (дата обращения: 29.11.2019).

Osnovy tekhnologii mashinostroyeniya [Fundamentals of technology of machine building]. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: www.ostm.ru/cp_xp_up_pr.html (accessed: 29.11.2019).

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 04.12.2019

Georgy Ivanovich Peftibay, head of department; e-mail: niigd.osmas-1@mail.ru;
Nikolay Aleksandrovich Galukhin, scientific associate; e-mail: niigd.osmas-7@mail.ru;
Dmitry Arkadyevich Mozalevskiy, engineer; e-mail: mozalevskiy.d@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) 332-78-36

PARAMETERS OF MEANS FOR DRAFTING WATER FROM A FIRE-IRRIGATION PIPELINE

Purpose. Calculation of metering characteristic, parameters of drilling the pipeline, leaktightness of a sealer, safety margin of a hook.

Methods. Analytical methods of computation of the parameters for drilling the pipeline, the leaktightness of a sealer between the drafting means and the pipeline, the safety margin of the hook, analytical and experimental methods of computation of the metering characteristic.

Results. The numerical values of the axial cutting force of the drill, the drill torque, the contact pressure on the sealer, the safety margin of the hook, the metering characteristic of the “nozzle – fire hose – drafting means” system have been obtained.

Scientific novelty. It has been demonstrated that the conditions of the compactness and minimum mass of the drafting means do not permit to calculate analytically the metering characteristic “nozzle – fire hose – drafting means” system due to the mutual influence of the local resistances. It has been suggested to determine the total metering characteristic of the “nozzle – fire hose – drafting means” system analytically and to find the metering characteristic of the flow passage of the drafting means experimentally. At that, the metering characteristic of the “nozzle – fire hose – drafting means” system has been proposed to be determined by summation of the metering characteristics obtained in the analytical and experimental ways.

Practical value. The obtained results may be used to improve the drafting means.

Keywords: *drafting means; pipeline; computation of cutting parameters; metering characteristic; safety margin of the hook.*

УДК 552.574:539.217.3

Виктория Петровна Орликова, науч. сотр.; e-mail: v.orlikova.69@gmail.com;

Евгений Александрович Головченко, нач. отд.; e-mail: obep.niigd@list.ru

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

283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-79-07

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ВНЕШНЕЙ ВЛАГИ В ЧАСТИЦАХ УГЛЯ

Цель. Количественная оценка удельной поверхности и гранулометрического состава углей различной стадии метаморфизма и их влияние на процесс поглощения внешней влаги.

Методика. Аналитические и экспериментальные исследования показателей пористости частиц угля, влияющих на процесс поглощения внешней влаги.

Результаты. Проведена количественная оценка удельной поверхности и гранулометрического состава углей различной стадии метаморфизма и их влияние на процесс поглощения внешней влаги. Установлена аналитическая зависимость удельной поверхности фракций угля различной стадии метаморфизма от их диаметра. Представлены графические зависимости суммарного выхода частиц исследуемого угля от размера его фракций. С помощью уравнения Розина–Раммлера установлены значения показателя, характеризующего неоднородность полидисперсной смеси угольных частиц и способности к поглощению влаги.

Научная новизна. Исследование поглощения влаги углями различной стадии метаморфизма с помощью показателей пористости твердого топлива.

Практическая значимость. Экспериментальное определение показателей пористости углей различной стадии метаморфизма позволит исследовать процесс поглощения внешней влаги, влияющий на пылевзрывобезопасность горных выработок.

Ключевые слова: удельная поверхность; гранулометрический состав; ситовой анализ; уголь; внешняя влага.

Постановка проблемы. Взрывы мелких угольных частиц (пыли) в шахтах очень часто становятся причиной масштабных аварий с большим количеством человеческих жертв. Использование высокопроизводительных проходческих и очистных комбайнов нового поколения приводит к образованию тонкодисперсной угольной пыли, взрывчатость которой в основном зависит от концентрации в ней летучих веществ, золы, влаги и размера частиц.

Как показывают исследования, наиболее легко взрывается пыль углей с объемной долей летучих веществ 17...32 %. С увеличением зольности и влажности взрывчатость угольной пыли уменьшается и при массовой доле 40 % золы или 50 % влаги пыль теряет эту способность [1]. Наиболее опасны пылинки размером 10...75 мкм, однако если взрыв уже возник, то в него вовлекаются и крупные частицы размером 75...100 мкм. Пыль размером менее 10 мкм обладает пониженной способностью взрываться, что объясняет повышенное ее окисление и большую склонность к коагуляции и образованию хлопьев.

Для предупреждения образования взрывоопасной смеси угольной пыли с воздухом в соответствии с требованиями Правил безопасности в угольных шахтах проводят следующие мероприятия: побелку, осланцевание, обмывку интенсивного пылеобразования, а также в обводненных выработках взрывозащитные мероприятия основаны на применении воды и заключаются

в эффекте фазового перехода вода–пар, позволяющем при воспламенении (взрыве) отнять значительную часть тепловой энергии от фронта пламени и локализовать или предупредить взрыв (воспламенение) угольной пыли.

После обмывки горных выработок концентрация внешней влаги в угольной пыли должна быть не менее 12 %. Контроль влаги осуществляют специализированные газоаналитические лаборатории Государственной военизированной горноспасательной службы МЧС ДНР. Если в пробах установлена концентрация внешней влаги менее нормы, то немедленно проводят дополнительные работы по пылевзрывозащите выработок.

Таким образом, концентрация внешней влаги в отложившейся угольной пыли – один из параметров, характеризующих пылевзрывобезопасность горных выработок и подлежащих постоянному контролю.

Анализ последних исследований. Поглощение любого вида влаги обусловлено капиллярно-пористой структурой угля, при этом концентрацию внешней влаги определяют физико-механическими методами, основанными на поверхностном натяжении воды и механическом захвате ее макропустотами твердого топлива. Один из важных показателей пористой структуры угля – удельная поверхность частиц, характеризующая размер поверхности, и гранулометрический состав, показывающий распределение частиц по размеру. Общепринятой классификации по данным этих показателей не существует, поэтому **цель исследований** – количественная оценка указанных показателей пористости углей различной стадии метаморфизма и их влияние на процесс поглощения внешней влаги.

Материалы и результаты исследований. Макропоры угля с радиусом $r > (100...200) \cdot 10^{-9}$ м играют роль транспортных артерий в процессе поглощения внешней влаги. Распределение влаги по различным видам пор можно проследить с помощью удельной поверхности угля, доступной для процесса поглощения. Для определения удельной поверхности угля используют метод, предложенный Брунауэром, Эмметом и Теллером, основанный на теории полимолекулярной (многослойной) адсорбции [2].

Удельную поверхность угля определяют хроматографическим методом по низкотемпературной сорбции паров азота или аргона. Макропоры большинства ископаемых углей при температуре жидкого азота 77 К за время эксперимента остаются практически недоступными для паров газа, поэтому количество сорбированного при этих условиях вещества (сорбата) можно отнести на долю переходных и макропор.

Для расчета удельной поверхности используют линейную форму уравнения изотермы адсорбции

$$\frac{P}{V(P_0 - P)} = \frac{1}{V_m C} + \frac{(C-1) P}{V_m C P_0}, \quad (1)$$

где V – равновесное количество поглощенного сорбата, см³/г;

V_m – объем сорбата, покрывающего монослоем 1 г сорбента при нормальных условиях, см³/г;

C – отношение констант адсорбционного равновесия в первом слое и конденсации.

В интервале относительных давлений от 0,01 до 0,35, в котором происходит заполнение мономолекулярного слоя, уравнение (1) в координатах P/P_0 и $P/V(P_0 - P)$ дает прямую линию с тангенсом угла наклона $b = (C - 1)/V_M C$, моль/м³, и отрезком, отсекаемым на оси ординат $c = 1/(V_M C)$, моль/м³. Из полученных данных можно определить $V_M = 1/(c + b)$ и удельную поверхность сорбента $S_{уд}$, м²/г, по формуле

$$S_{уд} = \frac{V_M N_A A_M 10^{-20}}{M}, \quad (2)$$

где N_A – постоянная Авогадро, моль⁻¹;

A_M – площадь, занимаемая молекулой сорбата, м²;

M – молярный объем сорбата, м³/моль.

В результате ранее проведенных исследований длиннопламенного, газового жирного и слабоспекающегося угля с диаметром частиц до $64 \cdot 10^{-6}$ м рассчитаны значения $S_{уд}$ и определена массовая доля внешней влаги W_{ex} , присутствующей в этих углях. Установлена аналитическая зависимость удельной поверхности угля от его внешней влаги, которая представлена на рис. 1 и описана уравнением $S_{уд} = 0,16 \exp(0,54 W_{ex})$ с коэффициентом корреляции 0,94.

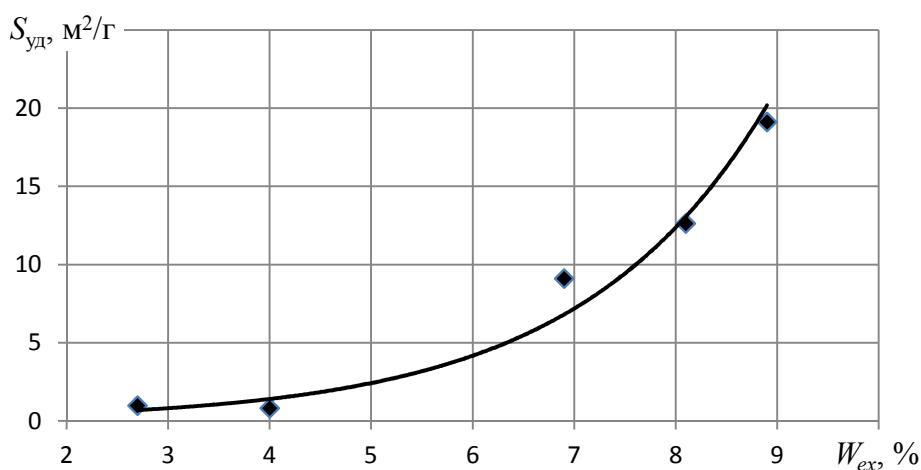


Рис. 1. Зависимость удельной поверхности угля от внешней влаги

Из представленных данных видно, что при удельной поверхности мезо- и макропор, близкой к нулю, угольная пыль имеет влажность, отличную от нуля, что можно объяснить объемным заполнением влагой микропор. Увеличение удельной поверхности угольных частиц происходит вследствие их измельчения и уменьшения диаметра, поэтому рассмотрим изменение $S_{уд}$ угля от его фракционного состава. В работе [3], рассматривающей десорбцию аргона, определена удельная поверхность фракций угля различной стадии метаморфизма

диаметром d , м, от 0 до $3,5 \cdot 10^{-3}$ м. На рис. 2 представлены характерные зависимости $S_{уд}$ от диаметра фракций, которые можно описать степенным уравнением с коэффициентами корреляции 0,92...0,98.

Анализ рис. 2 показывает, что уменьшение фракционного состава угля приводит к увеличению удельной поверхности, участвующей в процессе поглощения воды, и, следовательно, к увеличению массовой доли внешней влаги частиц твердого топлива.

Однако хроматографическое установление удельной поверхности – длительный и трудоемкий процесс, поэтому рассмотрим гранулометрический состав угля, который определяют методом ситового анализа, основанного на рассеивании пробы, предварительно измельченной при помощи шаровой мельницы. Результаты анализа гранулометрического состава угля, представленные в виде массового выхода различных фракций p в долях единицы или процентах, хотя и полно характеризуют этот состав, но вызывают трудности при сравнении углей различных марок и количественной оценки их неоднородности по фракциям.

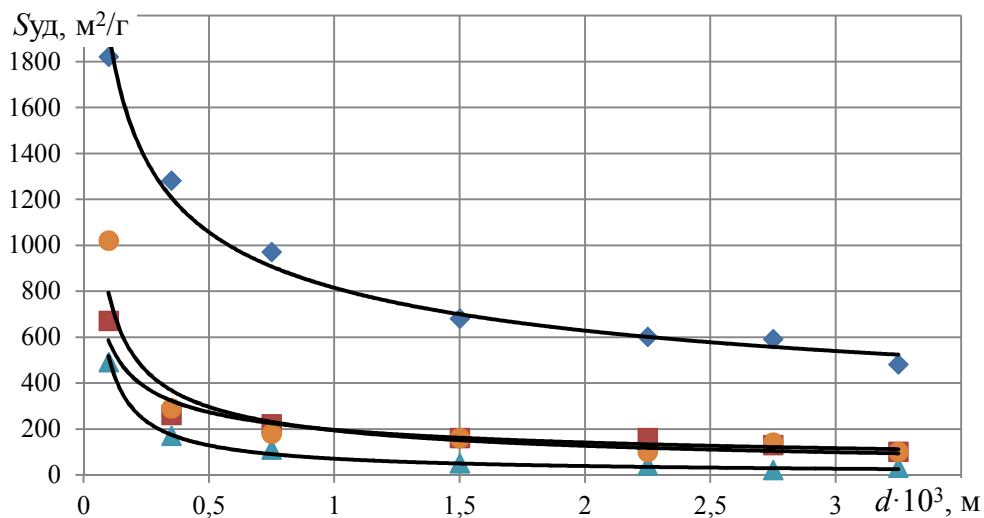


Рис. 2. Зависимость удельной поверхности угля различных шахт от диаметра фракций:

◆ – им. Челюскинцев; ■ – «Комсомолец»; ▲ – «Красный Октябрь»;
● – «Донецкая»

При обработке экспериментальных данных, кроме p , используют суммарные (кумулятивные) выходы P_i , %. Суммарным выходом по плюсу P_2 , %, называют выход частиц крупнее данного размера и получают его сложением относительных выходов частиц, размеры которых больше заданного. Если суммируют выходы частиц меньше данного размера, то получают суммарный выход по минусу P_1 , %. Зависимость суммарного выхода от размера фракции, представленную в графическом виде, называют суммарной характеристикой крупности.

С точки зрения математической статистики пробу измельченного угля можно рассматривать как статистическое объединение, которое состоит из членов, варьирующихся размером частиц d , мм, и массовым выходом отдельных фракций p , %. При этом аргумент объединения – размер частиц, а масса отдельной фракции представляет частоту или численность класса. Общая масса пробы носит название объема статистического объединения.

Один из способов сравнения кривых распределения фракционного состава различных углей – широко применяемое в математической статистике выравнивание подобных кривых с последующим подбором аналитического выражения для закономерностей изменения фракционного состава [4].

При аналитическом выражении кривых распределения аргумент функции – непрерывно изменяющийся размер частиц $x = d$, при этом для кривой распределения суммарного выхода, выраженного в дифференциальном виде $\dot{P}(x)$, установлена формула

$$\dot{P}(x) = \frac{dP_1(x)}{dx}. \quad (3)$$

Суммарная характеристика по минусу (т.е. выход частиц, который получают сложением относительных выходов частиц меньше данного размера) определена выражением

$$P_1(x) = P_1(d) = \frac{\int_0^x \dot{P}(x) dx}{\int_0^{x_{max}} \dot{P}(x) dx}, \quad (4)$$

а суммарная характеристика по плюсу (т.е. выход частиц, который получают сложением относительных выходов частиц больше данного размера)

$$P_2(x) = P_2(d) = 100 - P_1(x). \quad (5)$$

В 1934 г. Розин и Раммлер на основании обработки опытных данных гранулометрического состава получили зависимость, которую в настоящее время наиболее широко применяют для выравнивания различных кривых распределения измельченного угля [3]:

$$\dot{P}(x) = 100n x_e^{-n} x^{n-1} \exp[-(x/x_e)^n], \quad (6)$$

где x_e – параметр формулы, мм;

n – показатель неоднородности полидисперсной смеси частиц.

Особое практическое значение эта формула получила в теории и практике измельчения угля.

После преобразования и интегрирования выражения (6) получаем формулу для определения суммарной характеристики по плюсу в виде

$$P_2(x) = P_2(d) = 100 \exp[-(d/d_e)^n], \quad (7)$$

где d_e – размер частиц, соответствующий суммарному выходу по плюсу, равному 36,8 %.

При $d = d_e$ в смеси массовая доля 36,8 % частиц, размер которых выше заданного.

Использование размера частиц d_e не отражает физической сущности процесса измельчения, поэтому после преобразования и двойного логарифмирования формулы (7) получим выражение [4]

$$\lg\left(\lg \frac{100}{P_2}\right) = n \lg d - n \lg d_e + \lg(\lg e) = n \lg d + C. \quad (8)$$

Из этой формулы следует, что зависимость, построенная в координатах $\lg(2 - \lg P_2) - \lg d$, будет описана прямой линией с угловым коэффициентом, равным показателю неоднородности полидисперсной смеси частиц n .

На примере экспериментального исследования углей различной стадии метаморфизма рассмотрим применение уравнения Розина–Раммлера. Для установления гранулометрического состава угля навеску массой 300 г рассеивали на стандартном наборе сит и определяли остаток фракции угля m_i , г, на каждом сите в диапазоне размеров от d_i до d_{i+1} . По результатам ситового анализа рассчитывали массовый выход каждой фракции угля p , %, по формуле

$$p = 100m_{\phi}/m_{\text{исх}}, \quad (9)$$

где m_{ϕ} – масса фракции угля, г;

$m_{\text{исх}}$ – масса угля, поступившая на рассеивание, г.

Рассчитывали суммарную характеристику по плюсу P_2 , %, каждой фракции угля путем сложения массовых выходов частиц, размеры которых больше данной фракции. В табл. 1 представлены значения массового выхода фракции угля и суммарной характеристики по плюсу для размера фракции, используемого при ситовом анализе.

Таблица 1

Значения массового выхода фракции угля и суммарной характеристики по плюсу для размера фракции, используемого при ситовом анализе

Размер фракции $d_{i+1} - d_i$, мм	Массовый выход фракции угля p , % / Суммарная характеристика по плюсу P_2 , %				
	Шахта им. Челюскинцев	Шахта «Ждановская»	Шахта «Новоюзовская»	Шахта «Центральная»	Шахта «Щегловская-Глубокая»
20...10	76,55/76,55	65,90/65,90	63,54/63,54	19,34/19,34	6,44/6,44
10...5	15,73/92,29	19,56/85,47	17,51/81,06	20,24/39,57	8,95/15,39
5,0...2,5	3,38/95,67	6,08/91,55	5,58/86,64	9,60/49,18	4,91/20,30
2,5...1,0	2,04/97,71	3,67/95,22	5,20/91,84	19,69/68,87	39,20/59,50
1,0...0,5	0,53/98,24	1,03/96,25	1,32/93,16	7,62/76,49	6,41/65,91
0,5...0,25	0,46/98,70	1,13/97,37	2,03/95,19	9,46/85,96	12,17/78,08

Графическая зависимость суммарного выхода от размера фракции исследуемого угля, которая представляет собой суммарную характеристику его размеров, представлена на рис. 3.

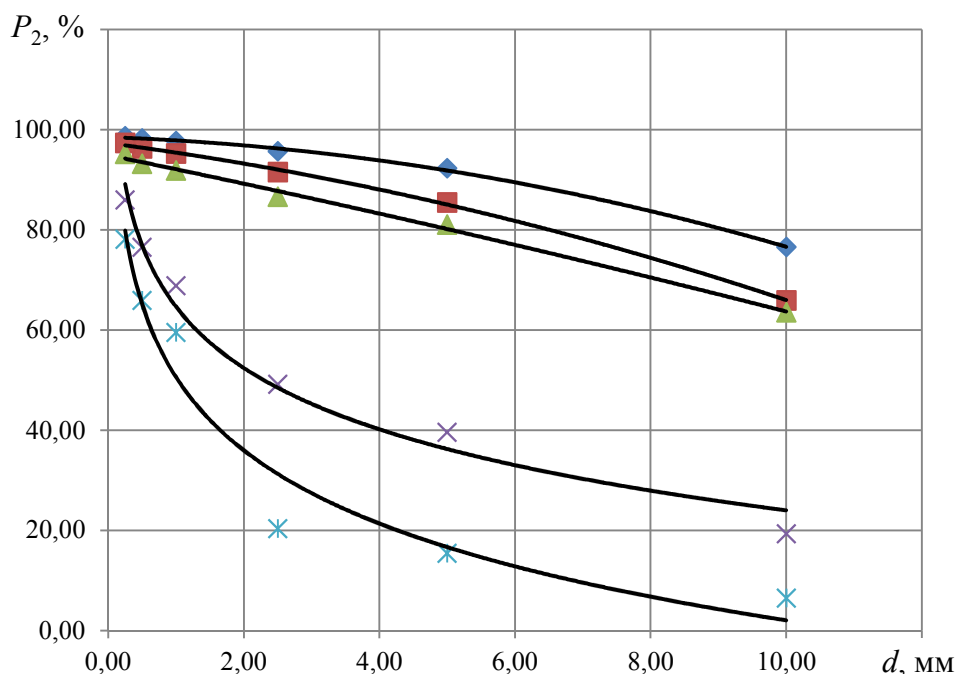


Рис. 3. Зависимость суммарного выхода от размера фракции исследуемого угля:

- ◆ – шахта им. Челюскинцев; ■ – шахта «Ждановская»;
- ▲ – шахта «Новоюзовская»; × – шахта «Центральная»;
- ✱ – шахта «Щегловская-Глубокая»

Выпуклая или вогнутая кривая зависимости говорит о преобладании в гранулометрическом составе крупных или мелких частиц угля: изменение кривизны зависимостей свидетельствует о том, что количество мелких частиц в составах увеличивается для углей шахт от им. Челюскинцев до «Щегловской-Глубокой».

Используя полученные значения, устанавливали зависимости суммарной характеристики по плюсу от размера фракции в координатах $\lg(2 - \lg P_2) - \lg d$ (рис. 4).

Анализ рис. 4 показывает, что суммарные характеристики по плюсу аппроксимированы линейной зависимостью во всем исследуемом диапазоне фракций с достоверностью R^2 от 0,93 до 0,99.

Из аналитических выражений, описывающих линейные зависимости, получены значения показателя неоднородности и размера частиц, соответствующего суммарному выходу по плюсу, равному 36,8 % (табл. 2).

Сравнивая коэффициенты уравнения Розина–Раммлера, приходим к выводу, что чем меньше параметр n , тем меньше частиц содержится в узком

интервале размеров и тем более неоднородна смесь частиц угля по фракционному составу.

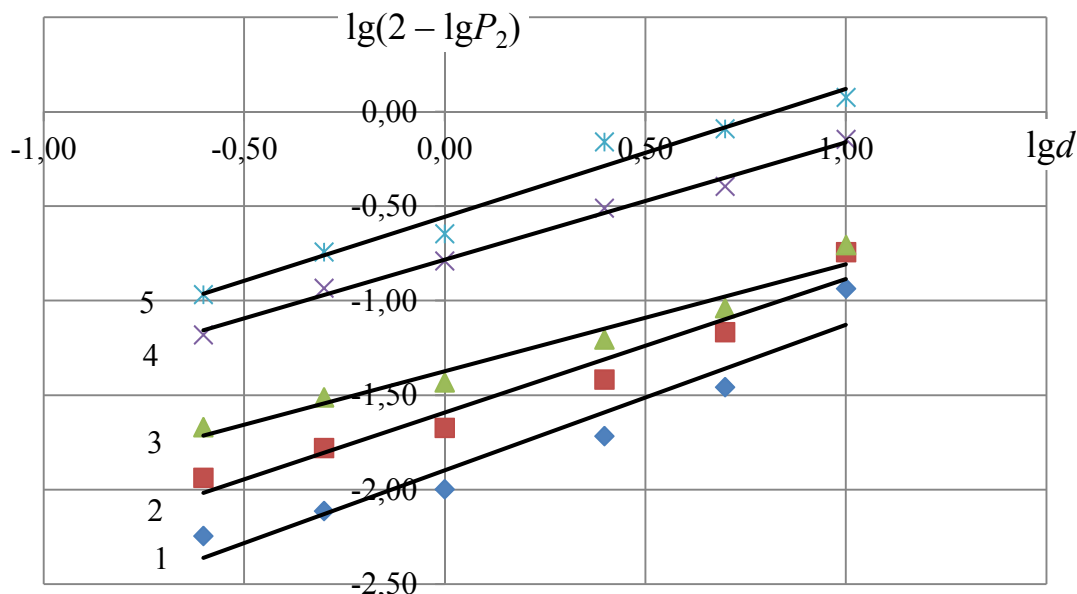


Рис. 4. Зависимость суммарной характеристики по плюсу от размера фракции в координатах $\lg(2 - \lg P_2) - \lg d$:

- ◆ – шахта им. Челюскинцев; ■ – шахта «Ждановская»;
 ▲ – шахта «Новоюзовская»; × – шахта «Центральная»;
 * – шахта «Щегловская-Глубокая»

Таблица 2

Значения показателя неоднородности и размера частиц угля для суммарного выхода по плюсу (36,8 %)

Предприятие	Показатель неоднородности частиц n	Размер частиц d_e , мм	Достоверность R^2
Шахта им. Челюскинцев	0,769	98,93	0,928
Шахта «Ждановская»	0,706	55,36	0,949
Шахта «Новоюзовская»	0,566	61,35	0,961
Шахта «Центральная»	0,620	4,78	0,993
Шахта «Щегловская-Глубокая»	0,676	1,94	0,969

Значение d_e для исследуемого угля шахты им. Челюскинцев имеет максимальное значение из полученных и равно 98,93 мм, что свидетельствует о минимальной концентрации мелких фракций частиц угля, способных поглощать внешнюю влагу. Для углей шахт «Центральная» и «Щегловская-Глубокая» размер частиц d_e имеет минимальные значения, поэтому массовая доля влаги данных углей будет максимальной.

Выводы. Дана количественная оценка удельной поверхности и гранулометрического состава углей различной стадии метаморфизма и их

влияние на процесс поглощения внешней влаги. С помощью уравнения Розина–Раммлера установлены значения показателя, характеризующего неоднородность полидисперсной смеси угольных частиц и способности к поглощению влаги.

Список литературы / References

1. Черечукин, В.Г. Теоретические исследования влияния выхода летучих веществ на определение концентрационных пределов взрывоопасности угольной пыли / В.Г. Черечукин, Е.И. Любомищенко // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2016. – № 5. – С. 380 – 385. – ISSN 0236-1493.

Cherechukin, V.G., Lyubomishchenko, Ye.I. *Teoreticheskiye issledovaniya vliyaniya vykhoda letuchikh veshchestv na opredeleniye kontsentratsionnykh predelov vzryvoopasnosti ugol'noy pyli* [Theoretical investigations of influence of volatile-matter yield on determination of concentration explosion hazard limits of coal dust]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'* – Mining information and analytical bulletin, 2016, no. 5, pp. 380 – 385. ISSN 0236-1493.

2. Влияние влаги на окисление каменных углей / С.П. Ворошилов, Я.С. Ворошилов, А.С. Ворошилов, В.А. Уварова // Вестник НЦ ВостНИИ. – Кемерово, 2008. – № 2. – С. 68 – 82.

Voroshilov, S.P., Voroshilov, Ya.S., Uvarova, V.A. *Vliyaniye vlagi na okisleniye kamennykh ugley* [Influence of moisture on black coal oxidation]. *Vestnik NTs VostNII* – Bulletin of the Scientific Centre VostNII for Industrial and Environmental Safety, Kemerovo, 2008, no. 2, pp. 68 – 82.

3. Пашковский, П.С. Эндогенные пожары в угольных шахтах / П.С. Пашковский. – Донецк: Ноулидж (донецкое отделение), 2013. – 792 с.

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

4. Самойлик, В.Г. Классификация твердых горючих ископаемых и методы их исследований: [монография] / В.Г. Самойлик. – Харьков: Водный спектр Джи-Ем-Пи, 2016. – 308 с.

Samoylik, V.G. *Klassifikatsiya tvyerdykh goryuchikh iskopayemykh i metody ikh issledovaniy: [monografiya]* [Classification of solid fossil fuels and methods of their investigation: a monograph]. Kharkov, Vodnyy spektr Dzhi-Em-Pi Publ., 2016, 308 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук В.Г. Агеевым
Дата поступления рукописи 12.12.2019

*Viktoria Petrovna Orlikova, scientific associate; e-mail: v.orlikova.69@gmail.com;
Yevgeny Aleksandrovich Golovchenko, head of department; e-mail: obep.niigd@list.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-81*

DISTRIBUTION OF SURFACE MOISTURE IN COAL PARTICLES

Purpose. Quantitative evaluation of the specific surface and granulometric composition of coal of the various metamorphic grades and their influence on the process of the surface moisture adsorption.

Methodology. Analytical and experimental investigations of porosity values of the coal particles that influence the surface moisture adsorption process.

Results. The quantitative evaluation of the specific surface and granulometric composition of coal of the various metamorphic grades and their influence on the process of the surface moisture adsorption has been conducted. The analytical dependence of the specific surface of coal fractions of the various metamorphic grades on their diameter has been established. The graphic dependences of the cumulative yield of the particles of coal subjected to the investigation on the size of its fractions have been presented. The values of the index that characterizes the heterogeneity of the polydisperse mixture of the coal particles and the abilities to absorb moisture have been established with the help of the Rosin-Rammler equation.

Scientific novelty. Investigation of the moisture absorption by coal of the various metamorphic grades with the help of the porosity indices of the solid fuel.

Practical value. The experimental determination of the porosity indices of coal of the various metamorphic grades will permit to investigate the process of the surface moisture absorption that influences the dust explosion safety of mine workings.

Keywords: *specific surface; granulometric composition; gram-size analysis; coal; surface moisture.*

II. Безопасность в чрезвычайных ситуациях

УДК 614.8"363"

Анатолий Федорович Иваненко, нач. отд.; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;

Петр Евгеньевич Мухин, канд. техн. наук, науч. сотр.; e-mail: petr63203@gmail.com

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

ОЦЕНКА РИСКА ВОЗНИКНОВЕНИЯ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ

Цель. Определение методологического подхода к анализу опасностей и оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, разработка алгоритма анализа опасностей и оценки риска.

Методика. Теоретические и информационно-аналитические исследования, анализ и обобщение основных методик оценки риска.

Результаты. На базе вероятностного метода разработана структурная модель оценки риска, определен механизм анализа опасностей и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах. Изложены требования к разработке рекомендаций по проведению анализа опасностей и оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций. Результаты исследований позволяют определить основные направления в совершенствовании нормативной правовой базы Донецкой Народной Республики в части анализа опасностей и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах.

Научная новизна. Разработан алгоритм комплексной оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах, в основе которого предложено использовать вероятностный метод. Изложены требования к рекомендациям по проведению анализа опасностей и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций, а также к определению конкретных уровней и критериев допустимого риска, отражающих специфику опасных производственных объектов.

Практическая значимость. Обоснована необходимость установления критериев оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах для разработки и совершенствования республиканской нормативной правовой базы. Определены основные этапы процесса оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах.

Ключевые слова: *чрезвычайная ситуация; анализ опасностей; оценка риска; критерии риска; опасный производственный объект.*

Постановка проблемы. Анализ причин происшедших аварий и инцидентов в различных отраслях промышленности ДНР указывает на необходимость всестороннего и объективного подхода к решению задачи предотвращения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах на стадиях технико-экономического обоснования, проектирования, подготовки технической документации, строительства и ввода в эксплуатацию, непосредственно эксплуатации, модернизации, консервации или ликвидации данных объектов.

В соответствии с требованиями ст. 3 Закона ДНР «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» обоснование безопасности опасного производственного объекта, а также изменения, вносимые в обоснование безопасности опасного производственного объекта, являются неотъемлемой

частью проектной документации. Согласно вышеуказанному Закону обоснование безопасности опасного производственного объекта – это документ, содержащий сведения о результатах оценки риска возникновения чрезвычайной ситуации на опасном производственном объекте и связанной с ней угрозы, об условиях безопасной эксплуатации опасного производственного объекта.

Анализ последних исследований и публикаций. Существует значительное количество литературных источников, посвященных различным подходам и методам анализа и оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах [1–5]. Однако простых и общедоступных подходов для применения крайне мало и они имеют общий характер. Кроме того, они не всегда учитывают специфические особенности, присущие опасным производственным объектам различных отраслей промышленности.

Изложение основного материала. Выбор методов оценки риска осуществляется с учетом целей и задач анализа, наличия необходимых данных, сложности рассматриваемого объекта. Для этого используют методы оценки риска, которые в общем случае подразделяют на феноменологические, детерминистские и вероятностные.

Феноменологический метод базируется на определении вероятности возникновения аварийных процессов исходя из результатов анализа, достаточных причин, связанных с реализацией тех или иных законов природы. Этот метод наиболее прост в применении, но требует достоверных значений состояний компонентов рассматриваемой системы. Метод предпочтителен при сравнении запаса безопасности различных типов потенциально опасных объектов, но малоприменим для анализа разветвленных аварийных процессов, развитие которых зависит от надежности тех или иных составных частей объекта и/или его средств защиты. Феноменологический метод реализуется на базе фундаментальных закономерностей, которые в последние годы объединяют в рамках новой научной дисциплины – физики, химии и механики катастроф [1, 2].

Детерминистский метод предусматривает анализ последовательности этапов развития аварий с определенными последствиями, начиная от исходного события, через последовательность предполагаемых стадий отказов, деформаций и разрушения компонентов до установившегося конечного состояния системы. Ход аварийного процесса изучают и предсказывают с помощью математического моделирования, построения имитационных моделей и проведения трудоемких расчетов. Детерминистский подход обеспечивает наглядность и психологическую приемлемость, так как дает возможность выявить основные факторы, определяющие ход процесса. Однако при этом существует потенциальная возможность упустить из вида какие-либо редко реализующиеся, но важные цепочки событий при развитии чрезвычайных ситуаций; построение достаточно адекватных математических моделей – сложная задача; для тестирования расчетных программ часто требуется проведение сложных и дорогостоящих экспериментальных исследований. В ядерной энергетике этот подход долгое время являлся основным при определении степени безопасности реакторов [1, 2].

Вероятностный метод анализа предполагает оценку вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций и расчет относительных вероятностей того или иного пути развития процессов. При этом анализируют разветвленные цепочки событий и отказов оборудования, выбирают подходящий математический аппарат и оценивают полную вероятность возникновения чрезвычайной ситуации. Основные ограничения вероятностного анализа связаны с недостаточностью сведений о функциях распределения параметров, а также статистических данных об отказах оборудования. Тем не менее вероятностный метод в настоящее время считается одним из наиболее перспективных для применения в будущем [3].

Процесс оценки риска включает в себя следующие этапы:

- идентификация риска;
- анализ риска возникновения чрезвычайных ситуаций;
- оценка вероятностных характеристик риска и эффективности существующих систем управления;
- количественная оценка уровня (степени) риска;
- сравнительная оценка риска.

Процедура идентификации риска основывается на информации:

- о персонале (квалификация и уровень профессиональной подготовки исполнителей и руководителей, статистические данные о травматизме и профзаболеваемости);
- о работе технических устройств (сведения об их состоянии, частоте и причинах отказов);
- об условиях и степени опасности окружающей среды.

Основная задача анализа риска возникновения чрезвычайных ситуаций – установление степени опасности опасного производственного объекта и/или его составных частей с целью предотвращения негативных последствий возникновения чрезвычайной ситуации техногенного характера для людей, окружающей среды, технических объектов и устройств, а также разработки, плановой реализации и своевременного корректирования обоснованных рекомендаций по снижению риска чрезвычайных ситуаций и/или мероприятий, направленных на снижение масштаба последствий чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте (рис. 1).

На стадиях технико-экономического обоснования, проектирования, подготовки технической документации рекомендуется решить следующие задачи анализа риска возникновения чрезвычайных ситуаций:

- определить процедуру идентификации опасностей;
- дать качественную и/или количественную оценку риска с учетом воздействия поражающих факторов аварии на людей, объекты и технические устройства, окружающую среду;
- определить степень опасности чрезвычайных ситуаций для выбора наиболее безопасных проектных решений;
- учесть сведения об опасностях чрезвычайных ситуаций при разработке стандартов предприятия, инструкций, технологических регламентов и планов

мероприятий по локализации и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций на опасном производственном объекте;

- обосновать, откорректировать и модернизировать организационные и технические меры безопасности;
- разработать рекомендации по снижению риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах.

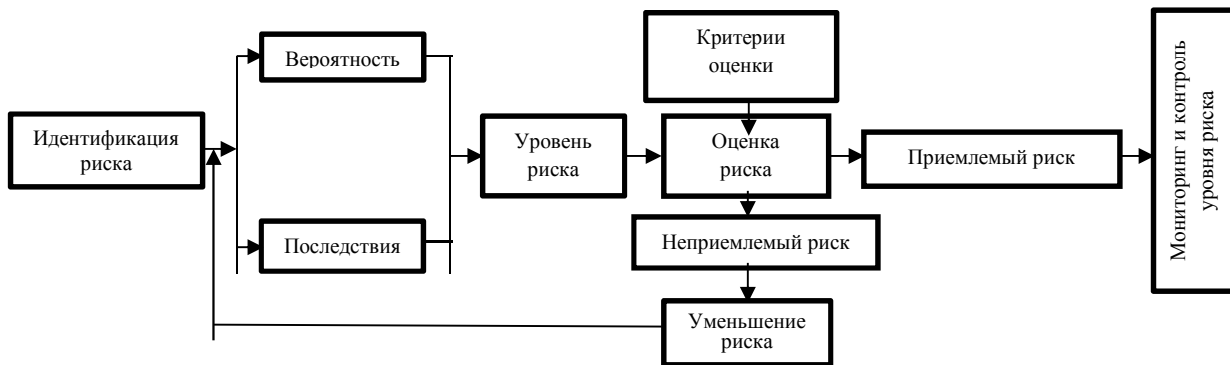


Рис. 1. Блок-схема анализа риска возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах

На стадиях ввода в эксплуатацию, непосредственно эксплуатации, модернизации, консервации или ликвидации опасного производственного объекта рекомендуется решить следующие задачи анализа риска возникновения чрезвычайных ситуаций:

- систематический мониторинг состояния опасного производственного объекта с периодической оценкой достаточности ранее разработанных мер по снижению риска возникновения чрезвычайных ситуаций и при необходимости их корректированием;
- идентификация опасностей с оценкой вероятности и возможных последствий чрезвычайных ситуаций, актуализация полученных ранее качественных или количественных оценок риска возникновения чрезвычайных ситуаций и разработка мероприятий по снижению риска;
- уточнение степени опасности возникновения чрезвычайных ситуаций;
- оценка достаточности специальных мер по снижению риска чрезвычайных ситуаций и корректирование оценки при необходимости [4].

На этапе оценки риска возникновения чрезвычайных ситуаций в зависимости от поставленных задач могут применяться методы количественной оценки риска аварий (являющиеся приоритетными), методы качественной оценки риска или их возможные сочетания (смешанная оценка риска). Рекомендуется последовательно осуществить качественную и/или количественную оценку:

- возможности возникновения и развития чрезвычайных ситуаций;
- тяжести последствий и/или ущерба от возможных чрезвычайных ситуаций;

• опасности возникновения чрезвычайной ситуации и связанной с ней угрозы в значениях показателей риска [2] (рис. 2).

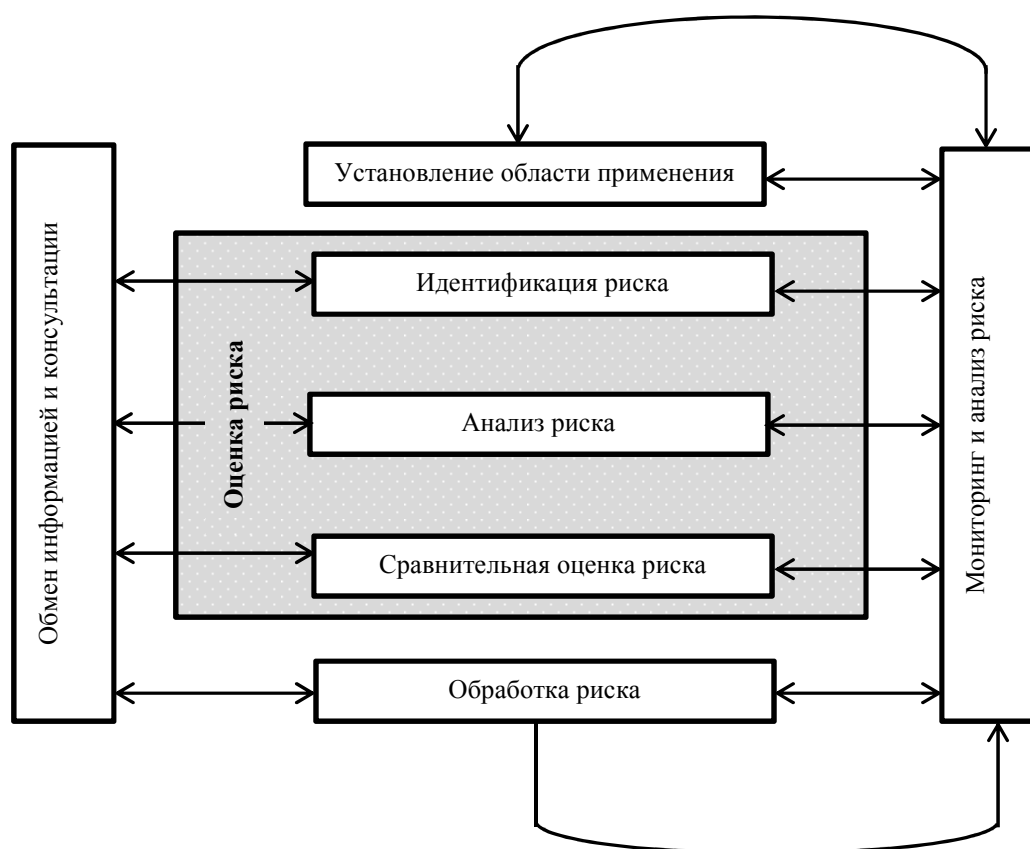


Рис. 2. Процесс оценки риска

При количественной оценке риска возникновения чрезвычайной ситуации R на опасном производственном объекте используют следующую формулу:

$$R = p_f C, \quad (1)$$

где p_f – вероятность появления потенциально опасных факторов, следствием которых может быть чрезвычайная ситуация;

C – ожидаемый ущерб от воздействия рассматриваемых опасных факторов при возникновении чрезвычайной ситуации.

Вероятность p_f – функция от надежности работы технических устройств, эффективности деятельности персонала, природно-технологических условий функционирования опасного производственного объекта, способствующих развитию чрезвычайной ситуации и вычисляется с использованием моделей надежности и безопасности:

$$p_f = f(H_q, H_m, H_c), \quad (2)$$

где H_q – надежность деятельности персонала;

H_m – надежность технических устройств;

H_c – надежность природно-технологической среды и прогноза ее состояния.

Ожидаемый ущерб C определяют с использованием моделей оценки последствий чрезвычайных ситуаций. Ожидаемый ущерб определяют в форме материального ущерба от чрезвычайной ситуации (прямого и косвенного) [1].

Для оценки частоты иницирующих и последующих событий в анализируемых сценариях чрезвычайных ситуаций рекомендовано использовать:

- статистические данные об аварийности, надежности технических устройств и технологических систем, соответствующие отраслевой специфике опасного производственного объекта или виду производственной деятельности;
- логико-графические методы («Анализ деревьев событий», «Анализ деревьев отказов» и др.), имитационные модели возникновения чрезвычайных ситуаций на опасных производственных объектах [5];
- экспертные специальные знания и сведения об аварийности и травматизме на опасных производственных объектах в различных отраслях промышленности.

Оценка негативных последствий от возможных чрезвычайных ситуаций предусматривает описание и определение размеров возможных воздействий на персонал и/или население, непосредственно на сам объект и/или его составные части, внешнюю среду. При этом оценивают негативные последствия чрезвычайных ситуаций (разрушение технических устройств, зданий, сооружений, пожары, взрывы, выбросы токсичных веществ, затопления, негативные последствия для персонала и окружающей природно-климатической среды); уточняют объекты, которые могут подвергнуться воздействиям поражающих факторов чрезвычайных ситуаций; используют соответствующие модели аварийных процессов. Результаты оценки риска чрезвычайных ситуаций могут содержать качественные и/или количественные характеристики основных опасностей возникновения, развития и последствий аварий, при этом рекомендуют проводить анализ неопределенности и достоверности полученных результатов, в том числе влияния исходных данных на рассчитываемые показатели риска.

Во многих случаях полученные расчетным путем значения риска не могут быть оценены, поскольку отсутствуют критерии приемлемого (допустимого) риска, с которыми следует сравнивать полученный расчетным путем результат. В итоге разработчику обоснования безопасности опасного производственного объекта приходится самому определять критерии приемлемого риска. Основным требованием к выбору или определению критерия приемлемого риска является его обоснованность и определенность. Условие приемлемости риска может выражаться в виде условий выполнения определенных требований безопасности, в том числе количественных критериев. Основания для определения критериев приемлемого риска: нормы и правила охраны труда и промышленной безопасности или иные документы по безопасности в анализируемой области; сведения о происшедших авариях, событиях, отказах, инцидентах и их

последствиях; опыт практической деятельности; социально-экономическая выгода от функционирования опасного производственного объекта.

Выводы. Необходимо приведение в нормативных документах по охране труда и промышленной безопасности, инструкциях, технических условиях конкретных, прежде всего количественных, показателей допустимого риска, критериев обеспечения безопасности, что будет способствовать качественной и эффективной оценке риска возникновения чрезвычайных ситуаций (аварий, событий, инцидентов, отказов) для обеспечения безопасного функционирования опасных производственных объектов.

Список литературы / References

1. Галеев, А.Д. Анализ риска аварий на опасных производственных объектах / А.Д. Галеев, С.И. Поникаров. – Казань : Изд-во КНИТУ, 2017. – 152 с.

Galeyev, A.D., Ponikarov, S.I. *Analiz riska avariyy na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh* [Analysis of risk of accidents at hazardous industrial objects]. Kazan, Izd-vo KNITU Press, 2017, 152 p.

2. Корчагин, А.Б. Надежность технических систем и техногенный риск / А.Б. Корчагин, В.С. Сердюк, А.И. Бокарев. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2011. – 228 с.

Korchagin, A.B., Serdyuk, V.S., Bokarev, A.I. *Nadyezhnost' tekhnicheskikh sistem i tekhnogennyy risk* [Technical systems safety and technogenic risk]. Omsk, Izd-vo OmGTU Press, 2011, 228 p.

3. Ковалевич, О.М. Возможности вероятностного метода прогнозирования рисков при реализации инфраструктурных проектов / О.М. Ковалевич // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2013. – № 2. – С. 37 – 42.

Kovalevich, O.M. *Vozmozhnosti veroyatnostnogo metoda prognozirovaniya riskov pri realizatsii infrastrukturykh proyektov* [Possibilities of probabilistic method of risk prognostication during implementation of infrastructural projects]. *Problemy bezopasnosti i chrezvychaynykh situatsiy – Problems of safety and emergencies*, 2013, no. 2, pp. 37 – 42.

4. Гражданкин, А.И. Допустимый риск – мера неприемлемой опасности промышленной аварии / А.И. Гражданкин, А.С. Печеркин, В.И. Сидоров // Безопасность труда в пром-сти. – 2015. – № 3. – С. 66 – 70.

Grazhdankin, A.I. *Dopustimyy risk – mera nepriyemloy opasnosti promyshlennoy avarii* [Acceptable risk as a measure of unacceptable danger of an industrial accident]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti – Labour safety in industry*, 2015, no. 3, pp. 66 – 70.

5. Губина, Т.А. Анализ методик по оценке рисков возникновения аварийных ситуаций на опасных производственных объектах / Т.А. Губина, А.А. Алексеев // Сб. статей по матер. IV Междунар. студ. науч.-практ. конф. – Новосибирск, 2016. – С. 162 – 175.

Gubina, T.A., Alekseyev, A.A. *Analiz metodik po otsenke riskov vozniknoveniya avariynykh situatsiy na opasnykh proizvodstvennykh ob'yektakh* [Analysis of methodologies for risk assessment of the occurrence of emergency situations

at hazardous industrial objects]. *Sb. statey po mat. IV Mezhdunar. stud. nauch.-prakt. konf.* [Collection of articles on the materials of the 4th International student scientific and practical conference]. Novosibirsk, 2016, pp. 162 – 175.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук А.Ф. Долженковым
Дата поступления рукописи 15.08.2019

Anatoly Fyodorovich Ivanenko, head of department; e-mail: ianatoliy58@yandex.ru;

Pyotr Yevgenyevich Mukhin, Cand. Sci. (Tech.), scientific associate; e-mail: petr63203@gmail.com

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

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

RISK ASSESSMENT OF OCCURRENCE OF EMERGENCY SITUATIONS

Purpose. Determination of a methodological approach to the hazard analysis and risk assessment of the occurrence of emergency situations at hazardous industrial objects, development of the algorithm of the risk analysis and assessment.

Methodology. Theoretical and information and analytical investigations, analysis and generalization of the principal methodologies of the risk assessment.

Results. Based on the probabilistic method the structural model of the risk assessment has been developed, the mechanism of the hazard analysis and risk assessment of the occurrence of emergency situations at hazardous industrial objects has been determined. The requirements for the development of the recommendations on carrying-out the hazard analysis and risk assessment of the occurrence of emergency situations have been presented. The investigation results allow determining the principal directions of improvement of the Donetsk People’s Republic legislative and regulatory framework in terms of the hazard analysis and risk assessment of the occurrence of emergency situations at hazardous industrial objects.

Scientific novelty. The algorithm of the complex risk assessment of the occurrence of emergency situations at hazardous industrial objects has been developed based on the suggestion to apply the probabilistic method. The requirements for the recommendations for carrying-out the hazard analysis and assessment risk of the occurrence of emergency situations have been expounded as well as for determination of the concrete levels and criteria of the acceptable risk which reflect the specific character of the hazardous industrial objects.

Practical value. The necessity of establishing the criteria for the risk assessment of the occurrence of emergency situations at hazardous industrial objects has been substantiated for development and improvement of the republican legislative and regulatory framework. The main stages of the process of the risk assessment of the occurrence of emergency situations at hazardous industrial objects have been determined.

Keywords: *emergency situation; hazard analysis; risk assessment; risk criteria; hazardous industrial object.*

УДК [543.544:547.21-022.532]:614.841.2

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

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

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

МЕТОДИКА ОБНАРУЖЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ НЕФТЕПРОДУКТОВ ВО ФРАГМЕНТАХ ГОРЕВШИХ МАТЕРИАЛОВ

Цель. Разработка и метрологическая аттестация методики обнаружения алканов (предельных углеводородов) для идентификации остатков легковоспламеняющихся жидкостей во фрагментах, изъятых с места пожара.

Методы. Исследования паровоздушных смесей с применением методов аккумулятивной, газоадсорбционной и газожидкостной хроматографии. Математическая обработка экспериментальных данных и оценка значений показателей точности измерений.

Результаты. Создан высокочувствительный (10^{-10} г/см³) метод обнаружения алканов – ключевых компонентов легковоспламеняющихся жидкостей нефтяной природы, находящихся в следовых количествах на различных объектах-носителях. Определены времена выхода пиков алканов от пентана до октана и их изомеров на сорбентах различной полярности. Разработана и аттестована методика обнаружения алканов методом газовой хроматографии в пробах, изъятых с места пожара. Дана оценка значений показателей точности измерений, рассчитана расширенная неопределенность и пределы допускаемой относительной погрешности измерений.

Научная новизна. Впервые разработана методика с низкими порогами обнаружения алканов нормального и изомерного строения – на уровне наноконцентраций 10^{-10} г/см³, не требующая традиционно используемых в мировой практике экстракции и концентрирования проб. Впервые алканы рассматриваются как тестовые углеводороды на наличие во фрагментах, изъятых с места пожара, легковоспламеняющихся жидкостей – продуктов переработки нефти.

Практическая значимость. Методика предназначена для обнаружения и идентификации остатков легковоспламеняющихся нефтепродуктов во фрагментах, изъятых с места пожара, методом газовой хроматографии. Низкие пороги обнаружения методики позволили исключить экстракцию и концентрирование проб. Сочетание высокой чувствительности с экспрессностью и простотой исполнения позволяет оперативно проводить анализ и идентифицировать инициатор горения, повышая достоверность выводов пожарно-технических исследований.

Ключевые слова: алканы; критерий идентификации; пористое стекло; порог обнаружения; сорбент; хроматография.

Постановка проблемы. Продукты переработки нефти представляют собой сложные смеси, содержащие углеводороды различных классов: алифатические, ароматические, непредельные, предельные и др. Изучение подобных многокомпонентных смесей – сложная аналитическая задача, особенно при пожарно-технических исследованиях обгоревших фрагментов, изъятых с места пожара. Для обнаружения и дальнейшей идентификации следовых количеств легковоспламеняющихся продуктов переработки нефти целесообразно изучение определенной группы углеводородов, типичной для нефтепродуктов.

В состав товарных нефтепродуктов (бензин, керосин, дизельное топливо), растворителей (бензин «Калоша», уайт-спирит и др.) в тех или иных количествах

входят алканы – предельные углеводороды. Свойства алканов (температура кипения, летучесть паров, химическая инертность) позволяют выделить их в качестве тестовых на наличие остатков инициаторов горения нефтяного происхождения и дальнейшей их идентификации во фрагментах, изъятых с места пожара.

Анализ последних исследований. Анализ научных статей по пожарно-техническим проблемам показал, что большинство публикаций относятся к области усовершенствований метода флуоресцентной спектроскопии, с помощью которого можно обнаружить различные типы ароматических углеводородов [1–3]. Известно, что метод флуоресцентной спектроскопии не эффективен для обнаружения алканов, так как неполярные молекулы предельных углеводородов не обладают способностью флуоресцировать. Кроме того, низкая селективность и недостаточная чувствительность ограничивают возможности метода при исследовании фрагментов, изъятых с места пожара. На сегодняшний день методик с низкими порогами обнаружения легковоспламеняющихся жидкостей нефтяной природы и их идентификации во фрагментах, изъятых с места пожара, не обнаружено, что обуславливает актуальность исследования. Кроме того, в настоящее время полностью не изучены критерии идентификации бензина и керосина в пробах после пожара [4].

Цель исследования. Разработка методики с низкими порогами обнаружения (ниже 10^{-9} г/см³) компонентов легковоспламеняющихся жидкостей во фрагментах, изъятых с места пожара, и подтверждение соответствия методики установленным метрологическим требованиям к измерениям путем аттестации.

Изложение основного материала. В основу разработки методики положен метод газовой хроматографии.

В качестве объектов исследований выбраны пентан (C₅H₁₂), гексан (C₆H₁₄), гептан (C₇H₁₆), октан (C₈H₁₈) и их изомеры: изопентан (изомер пентана), 3-метилгексан (изомер гептана), 3-метилгептан (изомер октана), изооктан (изомер октана) – обязательные компоненты распространенных и доступных для приобретения легковоспламеняющихся жидкостей нефтяной природы: бензина, керосина, дизельного топлива, уайт-спирита, бензина «Калоша» и др.

Оценку качества разделения углеводородов проводили на основе предварительно приготовленных тестовых (модельных) смесей алканов различного строения. Исследования выполняли на газовом хроматографе с пламенно-ионизационным детектором методом газоадсорбционной хроматографии. Для разделения смеси алканов приготовлены и испытаны насадочные колонки длиной 1, 2 и 3 м с силикатным пористым стеклом в качестве перспективного адсорбента [5]. Наиболее эффективен анализ, который оценивали по критерию разделения между наихудшим образом разделяемыми парами алканов: 3-метилгексан – гептан и 3-метилгептан – октан, и времени выхода пиков алканов на колонке с пористым стеклом длиной 2 м при температуре нагревания колонки 130 °С.

Определены оптимальные параметры газохроматографического разделения смеси алканов на адсорбенте – силикатном пористом стекле (табл. 1).

Таблица 1

Параметры газохроматографического анализа

Параметр	Значение параметра
Зернение адсорбента, мм	0,25...0,315
Внутренний диаметр колонки, мм	2
Расход газа-носителя (гелия), мл/мин	30
Расход воздуха, мл/мин	300
Расход водорода, мл/мин	30
Температура термостата колонок, °C	130
Температура детектора, °C	190
Температура испарителя, °C	200
Объем анализируемой пробы, мл	0,3...3
Время измерений, мин	5

Запись хроматограммы производили с чувствительностью четвертого масштаба (рис. 1).

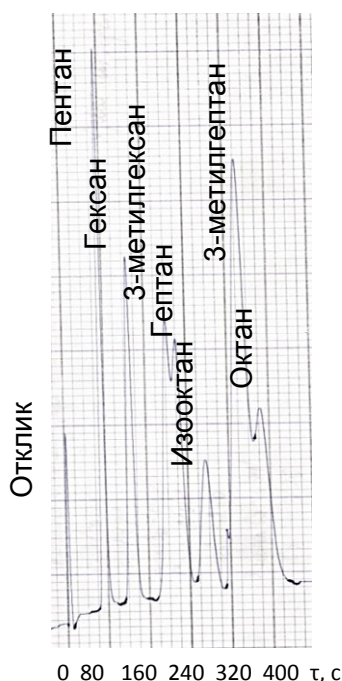


Рис. 1. Хроматограмма разделения пентана, гексана, гептана, октана и их изомеров: 3-метилгексана, 3-метилгептана, изооктана на силикатном пористом стекле

Кроме изучения газохроматографического разделения алканов на силикатном пористом стекле, исследовано разделение смеси алканов с использованием сорбентов на основе различных инертных твердых носителей и жидких фаз методом газожидкостной хроматографии. Для приготовления сорбентов в качестве инертных твердых носителей взяты хроматон N-AW

и инертон AW-DMCS, которые обладают однородностью и низкой удельной поверхностью. Эти носители легко подвергаются химическому модифицированию, свойства колонки, заполненной такими сорбентами, довольно легко воспроизводятся.

Для улучшения селективности проведено модифицирование поверхности твердых носителей жидкими фазами, которые отличаются химической природой, полярностью и вязкостью, взятыми в разных массовых долях от массы инертного твердого носителя (5...15 %). В результате исследования разработан полярный сорбент с приблизительно равным массовым обменом между подвижной и неподвижной фазой, что обеспечило выход алканов в сложных многокомпонентных системах в виде группового пика с различными значениями времени выхода.

Оптимальную температуру нагревания колонки, обеспечивающую групповое разделение алканов на полярном сорбенте, определяли экспериментально с учетом температурного максимума полярной жидкой фазы – полиэтиленгликольадипината (180 °С) в диапазоне температур нагревания колонки 80...130 °С с интервалом 10 °С при установленном объемном расходе гелия 30 мл/мин.

Степень полноты разделения сформированных групповых пиков алканов для каждой температуры диапазона определяли по коэффициенту разделения групповых пиков K , значения которого рассчитывали по уравнению

$$K = \frac{(h_1 - h_{min})}{h_1},$$

где h_1 – высота меньшего пика, мм;

h_{min} – высота минимума между пиками, мм.

В диапазоне температур нагревания колонки 80...110 °С эффективного группового разделения на полиэтиленгликольадипинате не происходит – смесь алканов, состоящая из семи компонентов, разделяется на три пика.

Наиболее эффективное групповое разделение алканов на полиэтиленгликольадипинате показала колонка при температуре нагревания 130 °С. Это можно объяснить физико-химическими свойствами исследуемых алканов (близкие температуры кипения, летучесть паров разделяемых алканов) и свойствами примененного сорбента (размер частиц, полярность), которые обеспечивают оптимальную скорость массообмена между подвижной и неподвижной полярной фазой в колонке.

Время выхода групповых пиков алканов снижается с 38 до 28,5 с при увеличении температуры нагревания колонки от 80 до 130 °С, так как при этом ускоряется процесс десорбции углеводородов в колонке, что приводит к сокращению времени проведения анализа. По результатам исследования модельных смесей построена зависимость коэффициента разделения K от

температуры нагревания колонки T , °C, в диапазоне 80...130 °C с интервалом 10 °C при фиксированном объемном расходе газа-носителя 30 мл/мин (рис. 2).

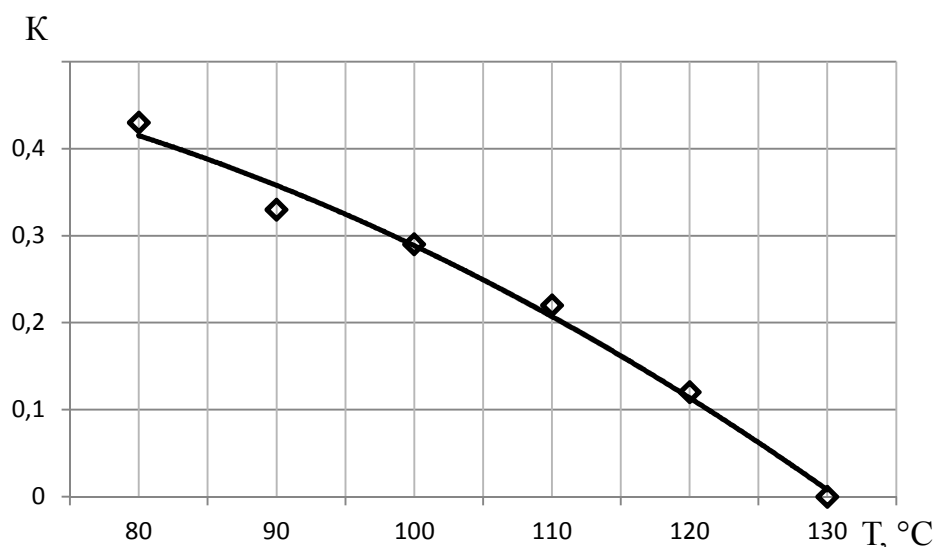


Рис. 2. Зависимость коэффициента разделения групповых пиков алканов от температуры нагревания колонки

В диапазоне температур нагревания колонки 80...120 °C коэффициент разделения групповых пиков снижается с 0,43 до 0,12 и равен 0 при 130 °C. При данной температуре нагревания колонки за счет массообменных процессов между подвижной фазой (газ-носитель) и полярным сорбентом происходит оптимальное групповое разделение алканов.

На рис. 3 приведены хроматограммы паровоздушной фазы модельных смесей алканов на полиэтиленгликольадипинате при температуре нагревания колонки 80 и 130 °C и постоянном объемном расходе газа-носителя 30 мл/мин.

Повышение температуры нагревания колонки от 80 до 130 °C обеспечивает выход углеводородов из хроматографической колонки одним групповым пиком (см. рис. 3), что свидетельствует о влиянии температуры на скорость массообмена как фактора, улучшающего групповое разделение сложных смесей на полярной колонке.

Оптимизация температурного режима позволила снизить порог обнаружения до уровня наноконцентраций (ниже 10^{-9} г/см³) и считать выбранные условия эксперимента приемлемыми для практического использования. Низкие значения порога обнаружения методики позволяют обнаружить и идентифицировать во фрагментах, изъятых с места пожара, следовые количества легковоспламеняющихся жидкостей нефтяной природы: бензин, керосин, дизельное топливо, уайт-спирит, бензиновые растворители БР-1, БР-2 и др.

Установлены критерии идентификации сложных углеводородных смесей, содержащих алканы – время выхода группового пика и отпечаток групповой хроматограммы (аналогично отпечатку пальцев), для более простых

углеводородных смесей – время выхода пиков индивидуальных алканов. В результате экспериментов получены исходные данные для оценки значений показателей точности методики. Точность результатов хроматографического анализа обеспечивалась пятикратной повторяемостью опытов.

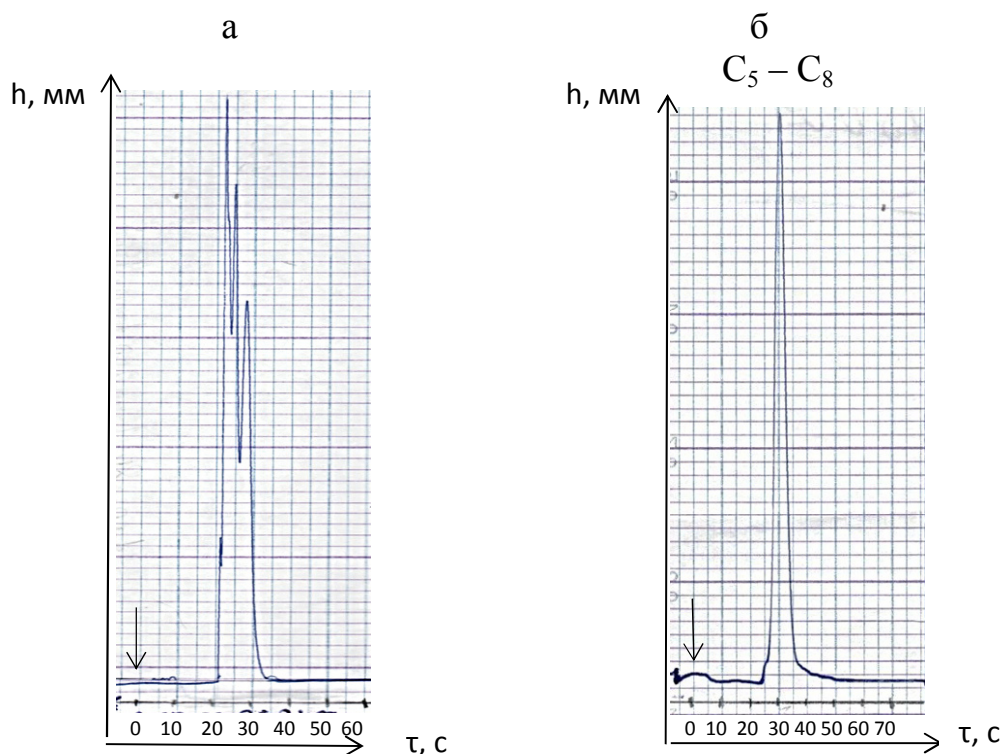


Рис. 3. Хроматограммы модельных смесей алканов на полиэтиленгликольадипинате при объемном расходе газа-носителя 30 мл/мин:

- а – температура нагрева колонки 80 °С;
б – температура нагрева колонки 130 °С

Определены главные источники, которые могут влиять на формирование показателей точности измерений: погрешность секундомера, газового хроматографа и погрешность считывания значений оператором (исследователем) времени выхода хроматографического пика со шкалы секундомера. Рассчитана расширенная неопределенность измерений времени выхода пика алканов при коэффициенте охвата k , равном 2, предполагая прямолинейный закон распределения величин, и определены доверительные границы погрешности измерений времен выхода пиков при доверительной вероятности p , равной 0,95.

Так как метод предполагает обнаружение следовых количеств легковоспламеняющихся жидкостей, обязательным был расчет порога обнаружения для каждого алкана по разработанной методике (табл. 2).

Аттестованная методика прошла апробацию на фрагментах, изъятых с мест реальных пожаров.

Таблица 2

Показатели точности измерений методики

Определяемый компонент	Порог обнаружения, г/см ³	Расширенная неопределенность измерений при $k = 2$, с	Пределы допускаемой относительной погрешности измерений при $p = 0,95$, %
Пентан	$2,1 \cdot 10^{-10}$	0,55	$\pm 0,8$
Гексан	$4,3 \cdot 10^{-10}$	0,37	$\pm 0,2$
Гептан	$6,4 \cdot 10^{-10}$	0,41	$\pm 0,2$
Октан	$7,5 \cdot 10^{-10}$	0,31	$\pm 0,1$
3-метилгексан	$6,2 \cdot 10^{-10}$	0,48	$\pm 0,2$
3-метилгептан	$7,1 \cdot 10^{-10}$	0,37	$\pm 0,1$
Изооктан	$5,3 \cdot 10^{-10}$	0,37	$\pm 0,1$

Выводы. Изучена возможность использования алканов как тестовых углеводородов для идентификации инициаторов горения нефтяной природы. Разработана методика с низкими порогами обнаружения (10^{-10} г/см³) индивидуальных алканов, а также их смесей во фрагментах, изъятых с места пожара без экстракции и концентрирования проб. Расширение методической базы повышает точность результатов и достоверность выводов пожарно-технических исследований фрагментов, изъятых с места пожара.

Список литературы / References

1. Установление индивидуальных характеристик состава нефтепродуктов методами системного анализа / П.Н. Егоров, Ю.Н. Бельшина, С.В. Шарапов, М.И. Архипов // Проблемы управления рисками в техносфере. – 2013. – № 1. – С. 23 – 32.

Yegorikov, P.N., Bel'shina, Yu.N., Sharapov, S.V., Arkhipov, M.I. *Ustanovleniye individual'nykh kharakteristik sostava nefteproduktov metodami sistemnogo analiza* [Determination of individual characteristics of the petrochemical products composition by methods of the system analysis]. *Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere – Problems of risk management in the technosphere*, 2013, no. 1, pp. 23 – 32.

2. Проблемы и перспективы использования пожарно-техническими специалистами современных способов обнаружения и исследования средств для поджога / А.А. Воронцова, Д.В. Калашников, А.А. Липский, О.А. Эсатов // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2017. – № 2(23). – С. 72 – 77.

Vorontsova, A.A., Kalashnikov, D.V., Lipskiy, A.A., Esatov, O.A. *Problemy i perspektivy ispol'zovaniya pozharно-tekhnicheskimi spetsialistami sovremennykh*

sposobov obnaruzheniya i issledovaniya sredstv dlya podzhoga [Problems and prospects of application of the modern detection and investigation methods of arson means by fire investigation specialists]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii* [Bulletin of Voronezh institute of State Firefighting Service of EMERCOM of Russia]. 2017, no. 2(23), pp. 72 – 77.

3. Принцева, М.Ю. Применение метода флуоресцентной спектроскопии для обнаружения и установления состава легковоспламеняющихся и горючих жидкостей, используемых при поджогах / М.Ю. Принцева, И.В. Клаптюк, И.Д. Чешко // Пожарная безопасность. – 2010. – № 2. – С. 94 – 99.

Printseva, M.Yu., Klapyuk, I.V., Cheshko, I.D. *Primeneniye metoda fluorestsentnoy spektroskopii dlya obnaruzheniya i ustanovleniya sostava legkovosplamenyayushchikhsya i goryuchikh zhidkostey, ispol'zuyemykh pri podzhogakh* [Application of the fluorescence spectroscopy method for detection and determination of the composition of highly inflammable and combustible liquids used in arsons]. *Pozharnaya bezopasnost' – Fire safety*, 2010, no. 2, pp. 94 – 99.

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

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

5. Козлитин, А.А. Идентификация нефтепродуктов по результатам хроматографического исследования алканов / А.А. Козлитин, И.Н. Непочатых, Т.М. Лукомская // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – Донецк, 2019. – № 2(56). – С. 68 – 77.

Kozlitin, A.A., Nepochatykh, I.N., Lukomskaya, T.M. *Identifikatsiya nefteproduktov po rezul'tatam khromatograficheskogo issledovaniya alkanov* [Identification of petrochemical products by the results of the chromatographic study of alkanes]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator": nauch.-tekhn. zhurn.* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator": scientific-technical journal]. Donetsk, 2019, no. 2(56), pp. 68 – 77.

*Aleksey Andreyevich Kozlitin, head of department; e-mail: kozlitin1942@mail.ru;
Viktoria Valentinovna Lebedeva, senior scientific associate; e-mail: lebedenish@mail.ru
The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-55*

METHODOLOGY FOR DETECTING THE CONSTITUENTS OF PETROCHEMICAL PRODUCTS IN FRAGMENTS OF BURNT MATERIALS

Purpose. Development and metrological certification of the methodology for detecting alkanes (saturated hydrocarbons) for identification of residues of the highly inflammable liquids in the fragments extracted from a place of fire.

Methods. Investigations of the vapor-air mixtures with the application of accumulative, gas-adsorption and gas-liquid chromatography. Mathematical treatment of the experimental data and evaluation of values of the measurement accuracy indices.

Results. The highly sensitive method for detecting the alkanes (10^{-10} g/cm³), i.e. the key constituents of the highly inflammable liquids of oil nature in the form of trace quantities on various career objects, has been created. The migration times of the alkanes from pentane to octane and their isomers have been determined on sorbents of various polarities. The methodology has been developed and certified to detect the alkanes by the gas chromatography method in the samples extracted from the place of fire. The evaluation of the values of the accuracy measurement indices has been provided, the expanded uncertainty and the limits of the permissible relative error of measurements have been calculated.

Scientific novelty. The methodology with the low thresholds of detecting the normal and isomeric alkanes, i.e. at the levels of nanoconcentrations of 10^{-10} g/cm³, has been developed for the first time where the extraction and concentration of the samples traditionally used in world practice are not required. For the first time the alkanes are considered as the test hydrocarbons for presence of the petrochemical processing products in the fragments of the highly inflammable liquids extracted from the place of fire.

Practical value. The methodology is intended for detection and identification of the residues of the highly inflammable petrochemical products in the fragments extracted from the place of fire by the method of gas chromatography. The low thresholds of detection of the methodology have enabled eliminating the extraction and concentration of the samples. The combination of the high sensitivity with rapidity and implementation simplicity makes it possible to conduct the analysis and to identify the combustion initiator promptly increasing the reliability of the fire-technical investigations.

Keywords: *alkanes; identification criterion; porous glass; detection threshold; sorbent; chromatography.*

УДК 614.894.7:[614.841.41:620.1.05]

Руслан Сергеевич Плетенецкий, науч. сотр.; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;

Александр Витальевич Чапкович, гл. инж.р; e-mail: emajsept@mail.ru;

Виктор Иванович Францев, вед. инж.; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru;

Владимир Леонидович Котляров, слесарь-ремонтник; e-mail: oldvovan@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38062) 332-78-45*

ПРОВЕРКА ОГНЕСТОЙКОСТИ ДЫХАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Цель. Исследовать процессы горения, кинематические и электрические схемы автоматизированной установки для проверки огнестойкости дыхательных аппаратов.

Методика. Экспериментальные и теоретические методы исследований.

Результаты. Проведенные исследования позволили разработать конструкцию горелки, кинематическую и электрическую схемы и изготовить установку, осуществляющую проверку огнестойкости дыхательных аппаратов в автоматическом режиме.

Научная новизна. Разработаны конструкция горелки, кинематическая и электрическая схемы, которые отличаются тем, что обеспечивают регламентированные ГОСТами параметры установки для проверки огнестойкости.

Практическая значимость. Полученные результаты исследований позволили изготовить работающую в автоматическом режиме установку для проверки огнестойкости дыхательных аппаратов, соответствующую требованиям ГОСТов.

Ключевые слова: самоспасатель изолирующий; дыхательный аппарат; огнестойкость; воздействие открытого пламени; установка для проверки огнестойкости.

Постановка проблемы. Дыхательные аппараты (самоспасатели), предназначенные для применения в условиях пожара, должны проходить проверку на сохранение работоспособности после воздействия открытого пламени.

В Украине огнестойкость всех дыхательных аппаратов проверяли согласно ДСТУ EN 13274-4:2005. В Российской Федерации идентичные методы проверки согласно ГОСТ Р EN 13274-4-2012 применяют для аппаратов, которые не предназначены для пожарных.

В данных стандартах изложены три метода: статические испытания с шестью горелками, статические испытания с одной горелкой, испытания с одной горелкой на движущемся образце. Первые два метода не требуют какого-либо специального оборудования, последний метод требует наличия привода для вращения испытываемой лицевой части с линейной скоростью (60 ± 5) мм/с.

При использовании методов проверки огнестойкости, изложенных в данных стандартах, применяют горелки Теклю – стандартное лабораторное оборудование.

Параметры дыхательных аппаратов, применяемых при эвакуации из задымленных помещений во время пожара, в Российской Федерации регламентируют ГОСТ Р 53260-2009 и ГОСТ Р 53259-2009, которые для проверки огнестойкости требуют применения специального оборудования.

Анализ последних исследований. Согласно ГОСТам установка для определения огнестойкости самоспасателя (рис. 1) должна включать следующие составляющие:

- металлический муляж головы человека;
- баллон с пропаном;
- горелку с форсунками площадью $(450 \pm 20) \text{ см}^2$;
- прибор для измерения давления газа с верхним пределом измерений до $(5 \pm 0,2) \text{ кПа}$;
- прибор для измерения температуры пламени с погрешностью $\pm 10^\circ \text{C}$;
- термоэлектрический преобразователь ХА, класс допуска 2 по ГОСТ 6616-94;
- стойка с кронштейном для подвода самоспасателя к пламени;
- секундомер с погрешностью не более $\pm 0,1 \text{ с}$.

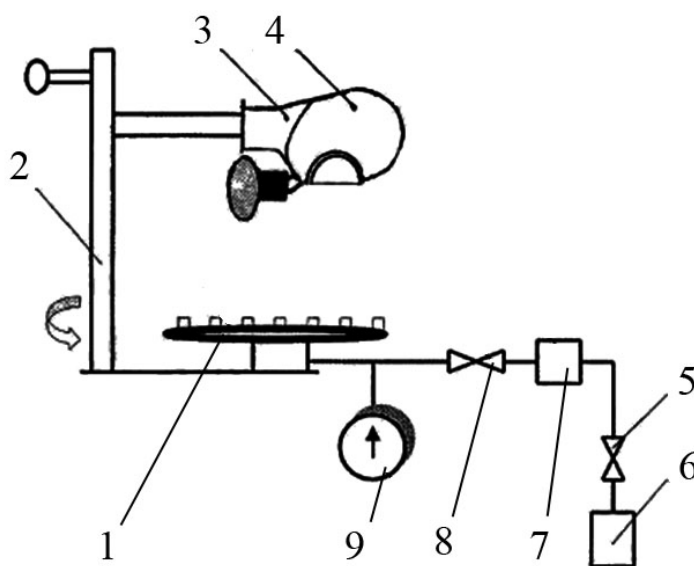


Рис. 1. Схема установки для определения огнестойкости самоспасателя:

1 – горелка с форсунками; 2 – стойка с ложементом для подвода самоспасателя в зону пламени; 3 – металлический муляж головы человека; 4 – капюшон самоспасателя; 5, 8 – вентили; 6 – баллон с пропаном; 7 – редуктор; 9 – прибор для измерения давления газа

При проведении испытаний капюшон (лицевую часть) самоспасателя надевают на металлический муляж головы человека, закрепленный на поворотной стойке.

Включают прибор для измерения температуры пламени. Открывают запорный вентиль баллона с пропаном. Подносят запальное устройство к горелке для воспламенения газа.

Устанавливают с помощью вентиля рабочее давление газа перед горелкой ($2,4 \pm 0,2$) кПа. Измеряют температуру пламени, определяют зону над горелкой, в которой температура пламени (800 ± 50) °С.

Включают огневую установку. Подводят капюшон (лицевую часть) самоспасателя в зону открытого пламени, засекают время по секундомеру. Время выдержки капюшона (лицевой части) в зоне пламени должно быть ($5,0 \pm 0,2$) с.

В течение этого времени самоспасатель однократно поворачивают над пламенем на 180°. Через ($5,0 \pm 0,2$) с капюшон (лицевую часть) выводят из зоны пламени и проверяют состояние капюшона (лицевой части). Капюшон (лицевая часть) не должен поддерживать горение или тление более ($5,0 \pm 0,2$) с.

Результат испытания считают положительным, если после его окончания капюшон (лицевая часть) не поддерживает горения или тления более ($5,0 \pm 0,2$) с, отсутствует разрушение материалов самоспасателя, а также сохраняется герметичность.

Невозможность приобретения установки для проверки огнестойкости вызвала необходимость ее разработки и изготовления силами НИИГД «Респиратор».

Результаты исследований. При разработке установки для проверки огнестойкости решены две задачи: расчет параметров конструкции газовой горелки и автоматизация процесса проверки. На первом этапе работы возникла необходимость в определении типа горелки, применение которой обеспечило бы необходимые параметры горения.

При первоначальной отработке конструкции установки были испытаны диффузионные газовые горелки ввиду простоты их конструкции. Однако проведенные испытания показали, что диффузионные горелки не обеспечивают стабилизации пламени: при увеличении рабочего давления газа перед горелкой до регламентированного ГОСТами значения наблюдался отрыв пламени – отделение пламени от горелки и ее погасание. Это было обусловлено тем, что скорость газового потока превышала скорость распространения пламени из-за отсутствия предварительного смешения горючего и окислительного компонентов газоздушнoй смеси [1]. При уменьшении подачи газа происходило затухание пламени по причине недостаточного поступления кислорода в область горения за счёт диффузии.

Также при перемещении муляжа головы и испытываемой лицевой части самоспасателя с регламентированной стандартом скоростью происходило затухание горелки диффузионного типа.

В дальнейшем для обеспечения параметров нагревания была применена инжекционная газовая горелка низкого давления с неполной инжекцией воздуха, показавшая удовлетворительный результат в ходе проведения испытаний (рис. 2). Основное преимущество горелок данного типа – их способность саморегулирования количества подсасываемого воздуха, поступающего для горения, то есть поддержание постоянной пропорции между количеством подаваемого в горелку газа и количеством инжектируемого воздуха при

неизменном давлении газа. Горелки данного типа устойчиво работают при низком давлении газа, обеспечивают хорошее смешение компонентов, достаточно надежны в эксплуатации [2].

Для обеспечения частичного смешения газа и воздуха с возможностью регулирования в определенных диапазонах (в зависимости от объемного расхода газа) в конструкции конфузора горелки предусмотрены отверстия, имеющие возможность регулирования просвета. В ходе настройки горелки определено, что стабильное горение факела происходило при открытии 30 % площади имеющихся отверстий, что обеспечивало коэффициент первичного воздуха α' в пределах от 0,3 до 0,7.

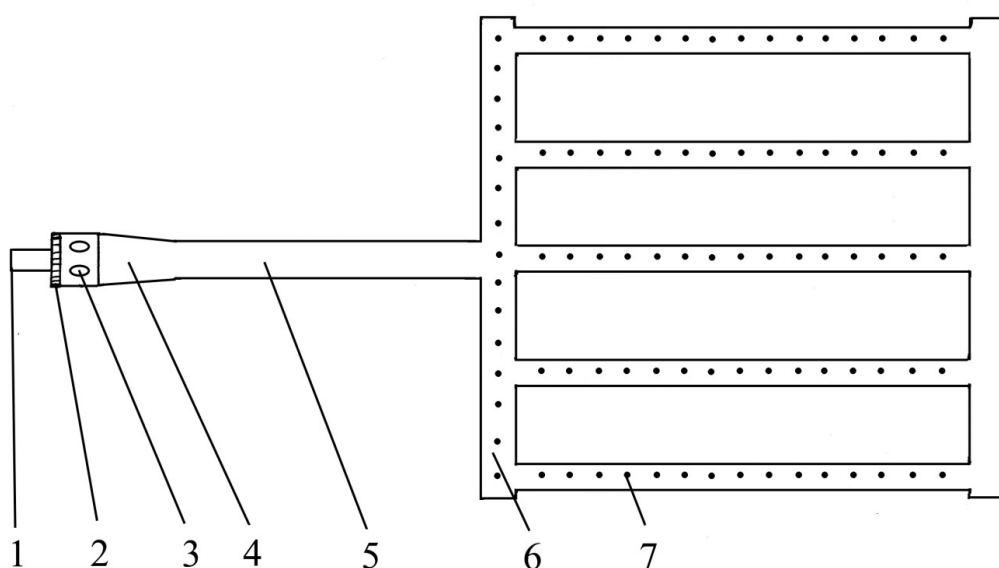


Рис. 2. Схема инжекционной горелки установки для определения огнестойкости самоспасателя:

1 – сопло; 2 – регулировочная гайка; 3 – отверстие с регулируемым просветом;
4 – конфузор; 5 – горловина; 6 – насадка; 7 – огневое отверстие

Поскольку насадки инжекционных горелок обычно повторяют форму обогреваемой поверхности и в зависимости от этой формы бывают кольцевыми, цилиндрическими либо щелевыми, для обеспечения требуемой ГОСТом площади $(450 \pm 20) \text{ см}^2$ и равномерного распределения пламени по площади насадка горелки установки была изготовлена в форме прямоугольника из труб с тремя дополнительными продольными перемычками (см. рис. 2). По поверхности данных труб равномерно распределены огневые отверстия.

Диаметр конфузора $D_{\text{конф}}$, м, и диаметр горловины $D_{\text{горл}}$, м, выбраны исходя из выражения [2]

$$D_{\text{конф}} = (1,5 \dots 1,7) D_{\text{горл}} \quad (1)$$

Для равномерного распределения газа по огневым отверстиям необходимо сохранение статического давления газозвдушной смеси в насадке, которое обуславливается площадью ее поперечного сечения, не менее чем в 1,5 раза большей, чем суммарная площадь всех огневых отверстий [3]

$$F_{HAC} \geq 1,5 \sum f_{do}, \quad (2)$$

где F_{HAC} – площадь поперечного сечения насадки, m^2 ;
 $\sum f_{do}$ – суммарная площадь огневых отверстий, m^2 .

Диаметр и количество огневых отверстий определяют из уравнения неразрывности газозвдушной смеси, вытекающей одновременно через все огневые отверстия [3]:

$$B(1 + u') = \sum f_{do} W_C, \quad (3)$$

где B – расход газа, m^3/c ;
 u' – объемный коэффициент инжекции;
 W_C – скорость истечения газозвдушной смеси, m/c ;
 $\sum f_{do}$ – суммарная площадь огневых отверстий, m^2 .

$$\sum f_{do} = n \frac{\pi d_0^2}{4}, \quad (4)$$

где n – количество огневых отверстий;
 d_0 – диаметр огневого отверстия, m .

Объемный коэффициент инжекции определяют из формулы

$$u' = \alpha' V_0, \quad (5)$$

где V_0 – теоретический объем воздуха, m^3 .

Расстояние между огневыми отверстиями должно быть достаточно большим, чтобы исключить возможность слияния соседних факелов и тем самым обеспечить инжекцию вторичного воздуха всей поверхностью факела. В то же время расстояние должно обеспечивать переброс (воспламенение) факела от одного отверстия к другому в момент разжигания горелки [3]. Это расстояние зависит от коэффициента первичного воздуха: при $\alpha' = 0,4$ расстояние между осями огневых отверстий S' , m , должно находиться в пределах от $3d_0$ до $4d_0$.

Разработанная кинематическая схема установки (рис. 3) обеспечивает перемещение муляжа головы с испытуемым образцом лицевой части в трёх плоскостях.

Двигатель РД-09-А (М1) посредством ременного редуктора с передаточным соотношением 1 : 2 передаёт вращение на червячный редуктор, обеспечивающий

поворот стойки вокруг своей оси. По стойке в направлении вверх – вниз благодаря реечной передаче перемещается штанга с муляжом головы. Поворот муляжа головы вокруг своей оси обеспечивает мотор-редуктор (М2) на базе электродвигателя переменного тока.

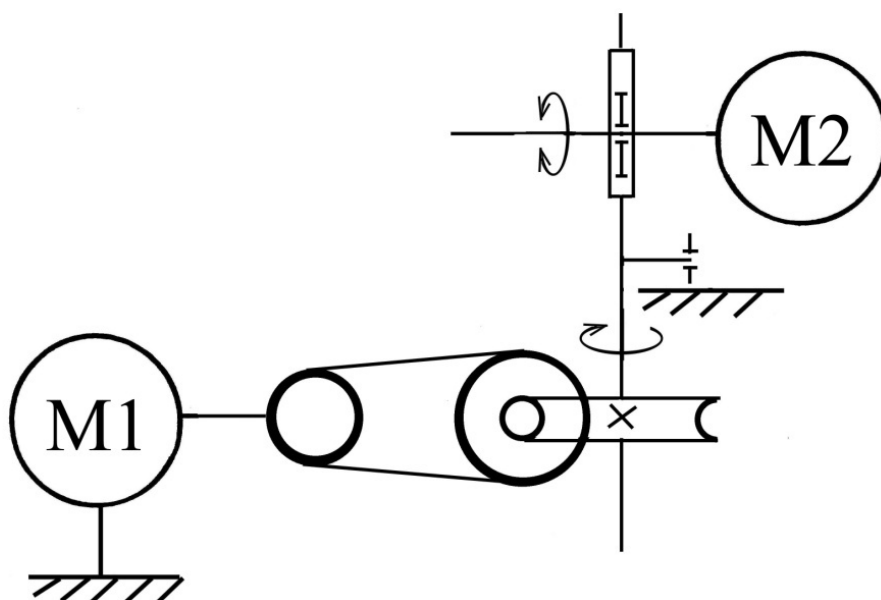


Рис. 3. Кинематическая схема установки для определения огнестойкости самоспасателя

Приведенная на рис. 4 принципиальная электрическая схема обеспечивает автоматизацию процесса проверки – перемещение маски в область открытого пламени, разжигание газа, поворот маски вокруг своей оси, вывод маски из области воздействия открытого пламени, а также временные параметры нахождения маски в зоне открытого пламени.

Реверсивный электродвигатель РД-09-А (ДР), применяемый для поворота вертикальной стойки, имеет угловую скорость вращения вала 185 мин^{-1} . Мотор-редуктор (ДП) на базе электродвигателя переменного тока, применяемый для поворота муляжа головы, имеет скорость вращения вала 2 мин^{-1} .

Для открывания (закрывания) подачи газа в установке использован клапан подачи газа ТАН F1 (PN 0,8 MPa DN 3,5 mm).

Схема управления установки – релейная, выполнена с применением реле РПУ-0-УХП4 (24 В) (К1 и К3), реле РП-21-УХЛ4А (24 В) (К2 и К4). Для питания электросхемы применен понижающий трансформатор с уровнем напряжения вторичных обмоток 12, 24 и 36 В. Для включения установки в работу используют малогабаритную кнопку КМ 2-1 (SB2). Для защиты схемы от короткого замыкания служат автоматические выключатели КУРР МСВ 60. Лампы типа КМ (24 В) сигнализируют о подключении к электрической сети (лампа красного

цвета), режиме наладки процесса горения (лампа белого цвета), режиме работы (лампа зеленого цвета).

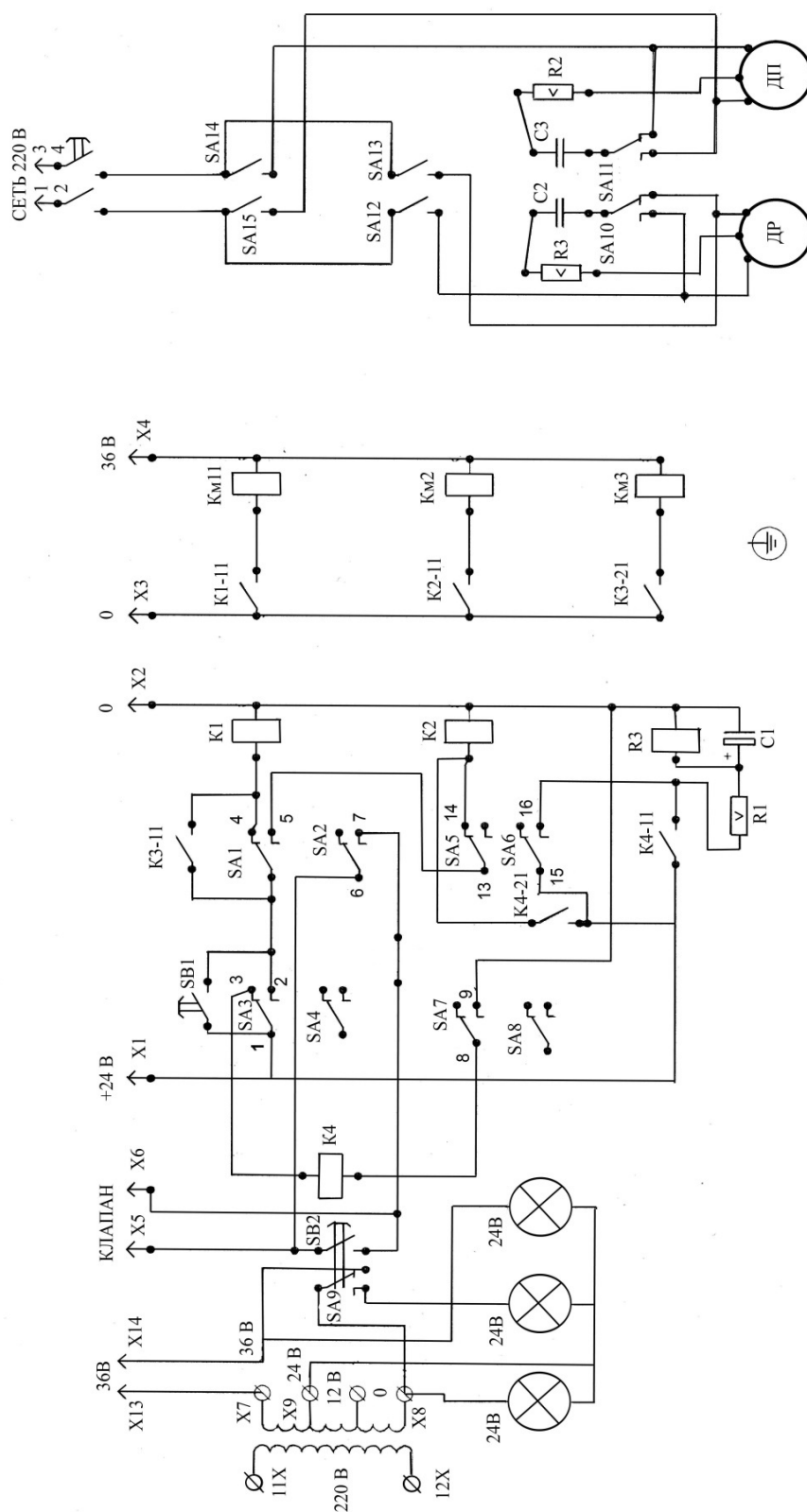


Рис. 4. Электрическая схема установки для определения огнестойкости самоспасателя

Проведённые испытания (рис. 5) показали соответствие созданной установки требованиям ГОСТов, предъявляемым к данному испытательному оборудованию.



Рис. 5. Установка для определения огнестойкости самоспасателя

Выводы. Проведенные исследования позволили разработать кинематическую и электрическую схемы, изготовить работающую в автоматическом режиме установку для проверки огнестойкости дыхательных аппаратов, обеспечивающую регламентированные ГОСТами параметры.

Список литературы / References

1. Колпакова, Н.В. Газоснабжение / Н.В. Колпакова, А.С. Колпаков; [науч. ред. Н.П. Ширяева]. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 200 с.
Kolpakova, N.V., Kolpakov, A.S.; Shiryayev, N.P., sci. ed. *Gazosnabzheniye* [Gas supply]. Yekaterinburg, Izd-vo Ural'skogo un-ta Press, 2014, 200 p.
2. Расчет газовых горелок / сост. С.А. Карауш. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2014. – 36 с.
Karaush, S.A. (author). *Raschyet gazovykh gorelok* [Computation of gas burners]. Tomsk, Izd-vo Tom. gos. arkhит.-stroit. universiteta Press, 2014, 36 p.
3. Кирпичников, В.П. Оборудование предприятий общественного питания : в 3 ч. Ч. 2. Тепловое оборудование / В.П. Кирпичников, М.И. Ботов. – 2-е изд., стер. – М. : Академия, 2012. – 496 с.

Kirpichnikov, V.P., Botov, M.I. *Oborudovaniye predpriyatiy obshchestvennogo pitaniya: v 3 ch. Ch. 2. Teplovoye oborudovaniye: 2-ye izd., ster.* [Equipment of public catering enterprises: in three parts. P. 2. Thermal equipment: 2nd ed., stereotype]. Moscow, Akademiya Publ., 2012, 496 p.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 09.01.2020

Ruslan Sergeyevich Pletenetskiy, scientific associate; e-mail: zoloto-russland@yandex.ru;

Aleksandr Vitalyevich Chapkovich, engineering manager; e-mail: emajsept@mail.ru;

Viktor Ivanovich Frantsev, advanced engineer; e-mail: oszd_niigd_3@mail.ru;

Vladimir Leonidovich Kotlyarov, maintenance man; e-mail: oldvovan@mail.ru

The "Respirator" State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-45

FIRE RESISTANCE TESTING OF BREATHING APPARATUSES

Purpose. To investigate the processes of burning, the kinematic and electric schematic diagrams of the automated installation for the fire resistance testing of the breathing apparatuses.

Methodology. Experimental and theoretical methods of the investigations.

Results. The conducted investigations have made it possible to develop the construction of a burner, the kinematic and electric schematic diagrams and to manufacture the installation conducting the fire resistance testing of the breathing apparatuses in the automatic mode.

Scientific novelty. The constructions of the burner, the kinematic and electric schematic diagrams have been developed that distinguish by the fact that they provide the compliance with the parameters of the fire resistance testing installation regulated by the state standards (GOSTs).

Practical value. The obtained results of the investigations have made it possible to manufacture the automatic installation for the fire resistance testing of the breathing apparatuses that complies with the requirements of the state standards (GOSTs).

Keywords: *self-contained self-rescuer; breathing apparatus; fire resistance; open flame influence; fire resistance testing installation.*

III. Охрана труда и экологическая безопасность

УДК [614.841.13:678.7]:614.842.612

Анатолий Филиппович Долженков, д-р техн. наук, нач. отд.; e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru;

Татьяна Олеговна Мороз, инж.; e-mail: tatiana.moroz@rambler.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-43*

НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ ПРОДУКТОВ ГОРЕНИЯ РЕЗИНЫ ВОДОЙ

Цель. Исследование возможности поглощения вредных веществ дистиллированной водой и водой естественных водоемов при орошении многокомпонентной газовой смеси, образующейся в процессе горения образцов резинотехнических изделий.

Методика. Анализ, обобщение и статистическая обработка результатов экспериментальных исследований параметров поглощения вредных веществ.

Результаты. Получены зависимости степени поглощения хлорида водорода, формальдегида и фенола от времени орошения.

Научная новизна. Найдена зависимость, связывающая между собой параметры, характеризующие процессы поглощения вредных веществ окружающими предметами, водяной завесой с химическими добавками к ней, и параметры вентиляционного потока, капель жидкости.

Практическая значимость. Полученные результаты позволят снизить концентрацию вредного вещества, образующегося в процессе горения образцов резинотехнических изделий, путем применения водяной завесы.

Ключевые слова: *резинотехнические изделия; газозавесные смеси; константа диссоциации; термодеструкция; хлорид водорода; формальдегид; фенол.*

Постановка задачи. Во время пожаров на складах и в других помещениях опасность представляют аварии и аварийные ситуации, связанные с химическим загрязнением продуктами горения резинотехнических изделий [1].

Анализ последних исследований. Проблеме химического загрязнения окружающей среды продуктами горения резиновых технических изделий (РТИ) различной степени опасности посвящен ряд публикаций [2, 3]. При ликвидации пожаров применяют различные способы нейтрализации продуктов горения [4].

Цель исследования – изучение возможности поглощения вредных веществ дистиллированной водой и водой из естественных водоемов при орошении многокомпонентной газовой смеси, образующейся в процессе горения образцов резинотехнических изделий.

Результаты исследования. Изучена возможность поглощения вредных веществ дистиллированной водой и водой из естественных водоемов при орошении многокомпонентной газовой смеси, образующейся в процессе горения образцов резиновых, резинотканевых, поливинилхлоридных изделий в условиях эксперимента в лабораторной испытательной камере по стандартной методике. Продолжительность проведения эксперимента поглощения вредных веществ 60 с. При этом было учтено, что в реальных условиях идет поглощение не чистого вещества, а смеси нескольких газов и на определение концентрации

влияет присутствие других растворенных веществ. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Поглощение вредного вещества из газовой смеси, образующейся при горении образца РТИ (орошение дистиллированной водой)

Определяемое вещество	Массовая концентрация до орошения, мг/м ³	Массовая концентрация после орошения, мг/м ³	Степень поглощения δ , % ($\omega_0 \cdot 10^3$, м/с)
Сероводород	9,86	5,60	43,0 (4,8)
Диоксид серы	26,30	9,21	65,0 (8,9)
Хлорид водорода	2045,00	468,00	77,0 (12,6)

Анализ табл. 1 показал, что самая высокая степень поглощения дистиллированной водой наблюдается при орошении хлорида водорода, что объясняется необратимой диссоциацией при растворении в воде с образованием ионов $\text{HCl} \rightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^-$ и самой высокой константой диссоциации ($K_d = 1 \cdot 10^7$ моль/дм³). То есть степень поглощения исследуемых вредных веществ водой возрастает с увеличением их константы диссоциации.

Очевидно, что все указанные вещества реагируют с водой и подвергаются при растворении электролитической диссоциации, поэтому имеют более высокую степень поглощения по сравнению с оксидом углерода. Сероводород (H_2S) и диоксид серы (SO_2) при растворении в воде образуют слабые кислоты, имеющие невысокие значения константы диссоциации (для H_2S : $K_{d1} = 6 \cdot 10^{-8}$ моль/дм³ и $K_{d2} = 1 \cdot 10^{-14}$ моль/дм³; для SO_2 : $K_{d1} = 1,58 \cdot 10^{-2}$ моль/дм³ и $K_{d2} = 6,31 \cdot 10^{-8}$ моль/дм³).

Поскольку один из факторов, влияющих на процесс поглощения, – время пребывания вредного вещества в зоне орошения, было исследовано влияние времени орошения на степень поглощения (табл. 2). Исходную концентрацию хлорида водорода получали испарением в условиях вынужденной конвекции под действием воздушного потока в замкнутом объеме, в котором проводили орошение.

Анализ табл. 2 показывает, что за первые 6 с орошения происходит поглощение почти 55 % хлорида водорода водой из естественных водоемов и более 70 % дистиллированной водой. После 16 с орошения водой из естественных водоемов поглощается более 82 % хлорида водорода, дистиллированной водой 94 %. То есть поглощение дистиллированной водой идет быстрее и более эффективно. Дальнейшее орошение не приводит к существенному повышению поглощения.

При горении резины образуются значительные количества хлорида водорода, концентрация которого при пожарах превышает значения ПДК. Поэтому поглощение хлорида водорода – одна из наиболее важных задач. Наряду с этим выделяются формальдегид и фенол, в связи с чем были исследованы процессы поглощения этих вредных веществ (табл. 3).

Таблица 2

Зависимость степени поглощения хлорида водорода от времени орошения

Поглотительный раствор	Поглощение хлорида водорода за 6 с орошения			Поглощение хлорида водорода за 10 с орошения			Поглощение хлорида водорода за 16 с орошения		
	С, мг/м ³	С _п , мг/м ³	δ, % (ω ₀ · 10 ³ , м/с)	С, мг/м ³	С _п , мг/м ³	δ, % (ω ₀ · 10 ³ , м/с)	С, мг/м ³	С _п , мг/м ³	δ, % (ω ₀ · 10 ³ , м/с)
Дистиллированная вода	17915	4949	72,3 (10,95)	4949	1032	79,1 (8,01)	17915	1032	94,2 (9,11)
Вода из естественных водоемов	5550	2533	54,3 (6,68)	2533	975	61,5 (4,88)	5550	975	82,4 (5,55)

С – концентрация вредного вещества в воздухе;

С_п – концентрация вредного вещества после поглощения

Таблица 3

Поглощение вредного вещества из газовой смеси, образующейся при горении РТИ, водой из естественных водоемов и дистиллированной

Поглотительный раствор	Поглощение формальдегида			Поглощение фенола		
	Массовая концентрация до орошения, мг/м ³	Массовая концентрация после орошения, мг/м ³	Степень поглощения δ, % (ω ₀ · 10 ³ , м/с)	Массовая концентрация до орошения, мг/м ³	Массовая концентрация после орошения, мг/м ³	Степень поглощения δ, % (ω ₀ · 10 ³ , м/с)
Дистиллированная вода	38,3	20,60	46,2 (5,30)	74,4	39,2	47,0 (5,50)
Вода из естественных водоемов	5,67	3,72	34,4 (3,60)	89,8	58,9	34,0 (3,60)

Как показали исследования, поглощение водой из естественных водоемов фенола и формальдегидов менее эффективно по сравнению с дистиллированной водой, вероятно, за счет присутствия в ней большого количества катионов натрия, калия и кальция и анионов хлора, которые по отношению к фенолу и формальдегиду обладают высаливающим действием, что приводит к снижению поглотительной способности воды.

Всего было проведено 10 экспериментов (n=10), что достаточно. Расчет количества наблюдений n, необходимого для получения достоверных величин, проводили по формуле

$$n = t^2 \sigma^2 / \Delta^2, \quad (1)$$

где Δ = tm_н;

t – критерий достоверности.

Среднеквадратическое отклонение σ определяли по формуле

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum d^2 P}{n-1}}. \quad (2)$$

Установлена зависимость (3), связывающая между собой параметры, характеризующие процессы поглощения вредных веществ окружающими предметами, водяной завесой с химическими добавками к ней, и параметры вентиляционного потока и капель жидкости в поле силы тяжести.

$$\bar{C} = C/C_1 = \exp\{(N_0 + N_1)[M/K^2 - (M+1)/K + M/(K+1)]\} \times \exp\left\{N_x^- + (N_0 + N_1) \left[\frac{M}{K^2} (1 + K\bar{x}) - \frac{(M+1)}{K} + \frac{M}{(K+1)} \exp(-\bar{x}) \right] \exp(-K\bar{x})\right\}, \quad (3)$$

где K – критерий моделирования, характеризующий столкновения капель жидкости со стенами помещения;

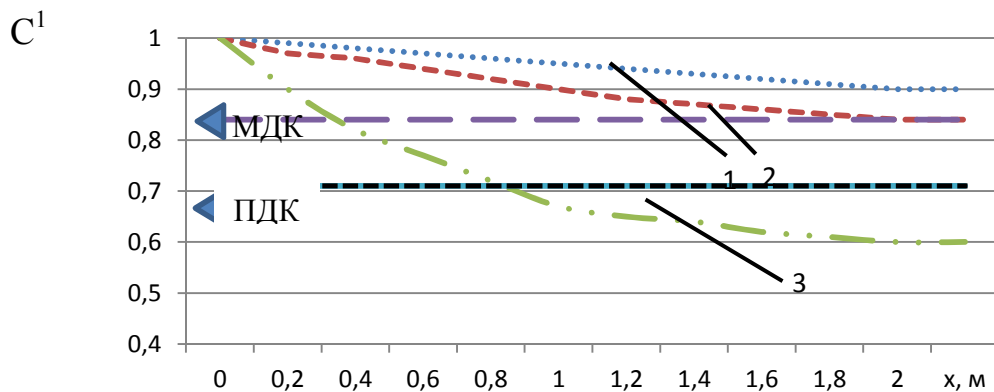
M – критерий подобия, характеризующий силы гравитации;

N, N_0, N_1 – критерии подобия при моделировании процессов поглощения вредных веществ соответственно стенами помещения, водяной завесой и химическими добавками к ней.

Анализ уравнения (3), полученного при разработке математической модели поглощения вредных веществ, показал, что степень поглощения может быть увеличена за счет введения в воду специальных реагентов.

На рисунке представлены результаты моделирования поглощения вредных веществ в относительных координатах при отсутствии и включении водяной завесы с химическими добавками и без них. При моделировании критерии подобия были приняты равными:

$K=0,5; \quad M=1; \quad N=0,05; \quad N_0=0-0,1; \quad N_1=0-0,4.$



Относительное изменение концентрации вредного вещества при лабораторном эксперименте:

- 1 – без использования водяной завесы; 2 – поглощение водой;
 3 – поглощение водным раствором с химической добавкой;
 1; - - - - 2; - • - 3; — МДК; — ПДК; - - - - - линейная (ПДК)

Выводы. Из рисунка видно, что для данных условий снизить концентрацию вредного вещества до максимально или предельно допустимого уровня с применением водяной завесы без химических добавок не удаётся. Следовательно, для снижения концентрации вредных веществ в помещениях за водяной завесой необходимо разработать и проверить в лабораторных условиях более эффективные составы водных композиций, обладающих поглотительной способностью основных вредных веществ.

Список литературы / References

1. Беляева, Л.С. Конвейерные ленты – источник токсичных веществ при пожарах / Л.С. Беляева, Н.Н. Бойко, О.А. Жадан // Уголь Украины. – 2001. – № 1. – С. 34 – 35.

Belyayeva, L.S., Boyko, N.N., Zhadan, O.A. *Konveyyernyye lenty – istochnik toksichnykh veshchestv pri pozharakh* [Conveyor belts as a source of toxic substances in fires]. *Ugol' Ukrainy – Coal of Ukraine*, 2001, no. 1, pp. 34 – 35.

2. Киреев, А.А. Экспериментальное определение массовой скорости выгорания резины / А.А. Киреев, А.Б. Каракулин, К.В. Жерноклёв // НУГЗУ: сб. науч. тр. – 2014. – Вып. 35. – С. 82 – 87.

Kireyev, A.A., Karakulin, A.B., Zhernoklyov, K.V. *Eksperimental'noye opredeleniye massovoy skorosti vygoraniya reziny* [Experimental determination of the rubber mass burning rate]. *NUGZU: sb. nauch. tr.* [NUGZU: collection of scientific papers]. 2014, issue 35, pp. 82 – 87.

3. Тарасова, Т.Ф. Экологическое значение и решение проблемы переработки изношенных автошин / Т.Ф. Тарасова, Д.И. Чапалда // Вестник Оренбургского гос. ун-та. – 2006. – Т. 2, № 2. – С. 130 – 135.

Tarasova, T.F., Chapalda, D.I. *Ekologicheskoye znacheniye i resheniye problemy pererabotki iznoshennykh avtoshin* [Ecological significance and problem solution of recycling the used tyres]. *Vestnik Orenburgskogo gosudarstvennogo universiteta – Bulletin of the Orenburg State University*, 2006, vol. 2, no. 2, pp. 130 – 135.

4. Hammer, Ch. Управление комплексного обращения с отходами: штат Калифорния: реферат 10 / Ch. Hammer, T.A. Gray // Ресурсосберегающие технологии: экспресс-информация / ВИНИТИ. – 2008. – № 3. – С. 14 – 31.

Hammer, Ch., Gray, T.A. *Upravleniye kompleksnogo obrashcheniya s otkhodami: shtat Kaliforniya: referat 10* [Management of complex waste handling: California: abstract 10]. *Resursosberegayushchiye tekhnologii: ekpress-informatsiya – Resource-saving technologies: express information*, VINITI Publ., 2008, no. 3, pp. 14 – 31.

Anatoly Filippovich Dolzhenkov, Dr. Sci. (Tech.), head of department; e-mail: dolzhenkov_52@mail.ru;

Tatyana Olegovna Moroz, engineer; e-mail: tatiana.moroz@rambler.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-43

NEUTRALIZATION OF PRODUCTS OF RUBBER COMBUSTION WITH WATER

Purpose. Investigation of a possibility of absorption of harmful substances with distilled water and water from natural reservoirs during the irrigation of the multicomponent gas-air mixture being produced in the process of the combustion of samples of industrial rubber articles.

Methodology. Analysis, generalization and statistical treatment of the results of experimental investigations of parameters of harmful substances absorption.

Results. The dependences of the degree of absorption of hydrogen chloride, formaldehyde and phenol on the irrigation time have been obtained.

Scientific novelty. The dependence linking the parameters which characterize the processes of absorption of harmful substances by ambient objects, by water screen with chemical additives, and the parameters of the ventilation flow and the liquid droplets has been found.

Practical value. The obtained results will make it possible to reduce the concentration of the harmful substance produced during the process of combustion of the samples of the industrial rubber articles by means of applying the water screen.

Keywords: *industrial rubber articles; gas-air mixtures; dissociation constant; thermal destruction; hydrogen chloride; formaldehyde; phenol.*

УДК 622.867:004.42

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

Владимир Владимирович Захлебн, инж. I кат.; e-mail: avarvent@mail.ru

*Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела, пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-34*

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ГОРНОСПАСАТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Цель. Разработать программный комплекс для решения горноспасательной службой на персональных электронно-вычислительных машинах задач по управлению аварийно-спасательными работами.

Методы. Анализ и обобщение исследований методов прогноза параметров развития аварий на горных предприятиях и способов их ликвидации.

Результаты. Создан программный комплекс, позволяющий оперативно выполнять многовариантные расчеты и предоставлять данные для выбора наиболее эффективных способов и средств ликвидации аварий (пожаротушения, последовательности изоляции аварийного участка, его инертизации, прогнозирования газовой обстановки на участке), а также определять руководителем горноспасательных работ последовательность действий горноспасательных отделений для быстрого и безопасного завершения работ по ликвидации аварии на персональных электронно-вычислительных машинах с наглядным представлением результатов в виде графиков, номограмм и таблиц.

Научная новизна. Разработанный программный комплекс позволяет решать тактические и оперативные задачи по управлению аварийно-спасательными работами Государственной военизированной горноспасательной службой Министерства по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий Донецкой Народной Республики.

Практическая значимость. Программный комплекс УАСПР предназначен для решения задач по управлению аварийно-спасательными работами горноспасательными подразделениями, позволяет оперативно выполнять сложные многовариантные расчеты на персональных электронно-вычислительных машинах в условиях ведения аварийно-спасательных работ и при разработке технической документации для горных предприятий.

Ключевые слова: угольная шахта; выемочный участок; аварийно-спасательные работы; программный комплекс; методика расчета; исходные данные; расчет на персональной электронно-вычислительной машине; горноспасательная служба.

Постановка проблемы. Практикой ведения горноспасательных работ установлено, что успех спасения горнорабочих, застигнутых в шахте аварией, зависит от оперативности принятия решений командным составом ГВГСС МЧС ДНР и действий горноспасательных подразделений в первоначальный момент ликвидации аварии, позволяющих в короткий срок вывести людей из аварийного участка и ликвидировать аварию в начальной стадии ее развития.

Анализ последних исследований. Постоянное изменение аварийной обстановки требует оперативного корректирования тактики горноспасательных отделений, выполняющих работы по спасению людей и ликвидации аварии. Это, в свою очередь, требует выполнения большого объема многовариантных расчетов, что в условиях ограниченного времени без ПЭВМ и специального программного обеспечения довольно сложно [1–3].

Многолетний опыт исследований в области горноспасательного дела и тесное сотрудничество с горноспасательной службой позволяют НИИГД «Респиратор» постоянно совершенствовать и разрабатывать средства, технологии и теоретические основы горноспасательного дела [4]. Любые тактические действия горноспасательных отделений должны быть обоснованы и спрогнозированы расчетами, ссылаться на нормативно-техническую и законодательную базу.

Устав ГВГСС МЧС ДНР – это основной нормативный документ, которым руководствуется служба ГВГСС МЧС ДНР при ликвидации аварий, составлении планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах, где учтены изменения, произошедшие в законодательной и нормативной базе ДНР, технике и технологии ликвидации аварий на угольных предприятиях, а также горноспасательной науке. Устав ГВГСС МЧС ДНР регламентирует основные положения организации и ведения аварийно-спасательных работ по спасению людей, застигнутых авариями в шахте, методы и средства ликвидации пожаров в результате взрывов, внезапных выбросов угля, породы и газа и других видов аварий [5–7].

Поэтому разработка программного продукта, способного оперативно выполнять необходимые расчеты и удовлетворяющего требованиям действующего нормативного документа, – актуальная задача.

Материалы и результаты исследований. На сегодняшний день большинство горных предприятий работает без реконструкции, имеет сложные и протяженные вентиляционные сети и низкий уровень противоаварийной защиты. В таких сложных условиях ведение горных работ представляет повышенную опасность, когда любая человеческая ошибка приводит к увеличению времени ликвидации ее последствий, ущерб и может повлечь за собой человеческие жертвы.

Статистика аварийности на угольных шахтах ДНР за период с 2014 по 2018 г. представлена в таблице [5].

Статистика аварийности на угольных шахтах ДНР за период с 2014 по 2018 г.

Показатель	Годы				
	2014	2015	2016	2017	2018
Подземный пожар	3	2	1	1	1
Взрыв газа и угольной пыли	4	1	0	1	1
Внезапный выброс угля и газа	4	0	0	0	0
Обрушение горных выработок	6	4	0	1	4
Затопление горных выработок	0	1	0	1	1
Авария на поверхности	12	3	5	6	6
Аварийная ситуация	71	39	19	74	22
Всего аварий и аварийных ситуаций	111	50	25	84	35
Общий ущерб от аварий, тыс. руб.	106614	43591	4258	179	1705

Основная опасность подземных пожаров – вероятность отравления людей продуктами горения. Высокая температура пожарных газов затрудняет или делает невозможным ведение аварийно-спасательных работ при тушении, изоляции пожаров или разведке.

Успешное ведение горноспасательных работ, направленных на спасение людей и ликвидацию аварии, зависит от степени подготовленности личного состава, оснащенности горноспасательных подразделений техническими средствами, четкой организации взаимодействия и оперативно-технической готовности командного состава.

Оперативно-техническая готовность ГВГСС МЧС ДНР к ликвидации аварий включает в себя следующее:

- знание и развитие аварийной обстановки;
- обоснованное определение метода ликвидации аварии;
- правильное распределение сил на аварийном участке и обследование выработок;
- применение эффективных средств локализации аварии;
- определение тактики ведения горноспасательных работ.

Все подразделения ГВГСС МЧС ДНР применяют программную систему РЕВОД, которая обеспечивает решение комплекса задач воздухо- и газораспределения в шахтной вентиляционной сети и дает возможность эффективно анализировать состояние шахтной вентиляционной сети в аварийных и в нормальных условиях работы горного предприятия.

Программная система РЕВОД позволяет производить автоматический поиск циркуляционных контуров, предоставляя тем самым информацию для разработки мероприятий по их ликвидации. Также обеспечивает возможность расчета зон загазования горных выработок метаном, оксидом углерода и другими вредными газами.

Помимо расчетов воздухо- и газораспределения, ГВГСС МЧС ДНР выполняет анализ и расчеты, связанные с ликвидацией различного вида аварий, тактических действий горноспасательных отделений, передвижений горнорабочих в самоспасателях по горным выработкам и др.

С этой целью разработан программный комплекс УАСПР, включающий в себя необходимый перечень задач, изложенных в требованиях Устава ГВГСС МЧС ДНР и другой технической документации, используемой ГВГСС МЧС ДНР при ведении горноспасательных работ на горных предприятиях.

Работа с программным комплексом УАСПР сводится к выводу на экран диалоговых окон, в которые вводят исходные данные и рассчитывают параметры различных аварийных ситуаций в угольных шахтах. При этом используют практически все средства Windows для управления расположением и размерами окон, которые помогают организовать работу на экране монитора.

Структура программного комплекса УАСПР (рис. 1) начинается с главного модуля (начало работы). Главное меню в верхней части экрана содержит стандартные для Windows интерфейса закладки, а именно:

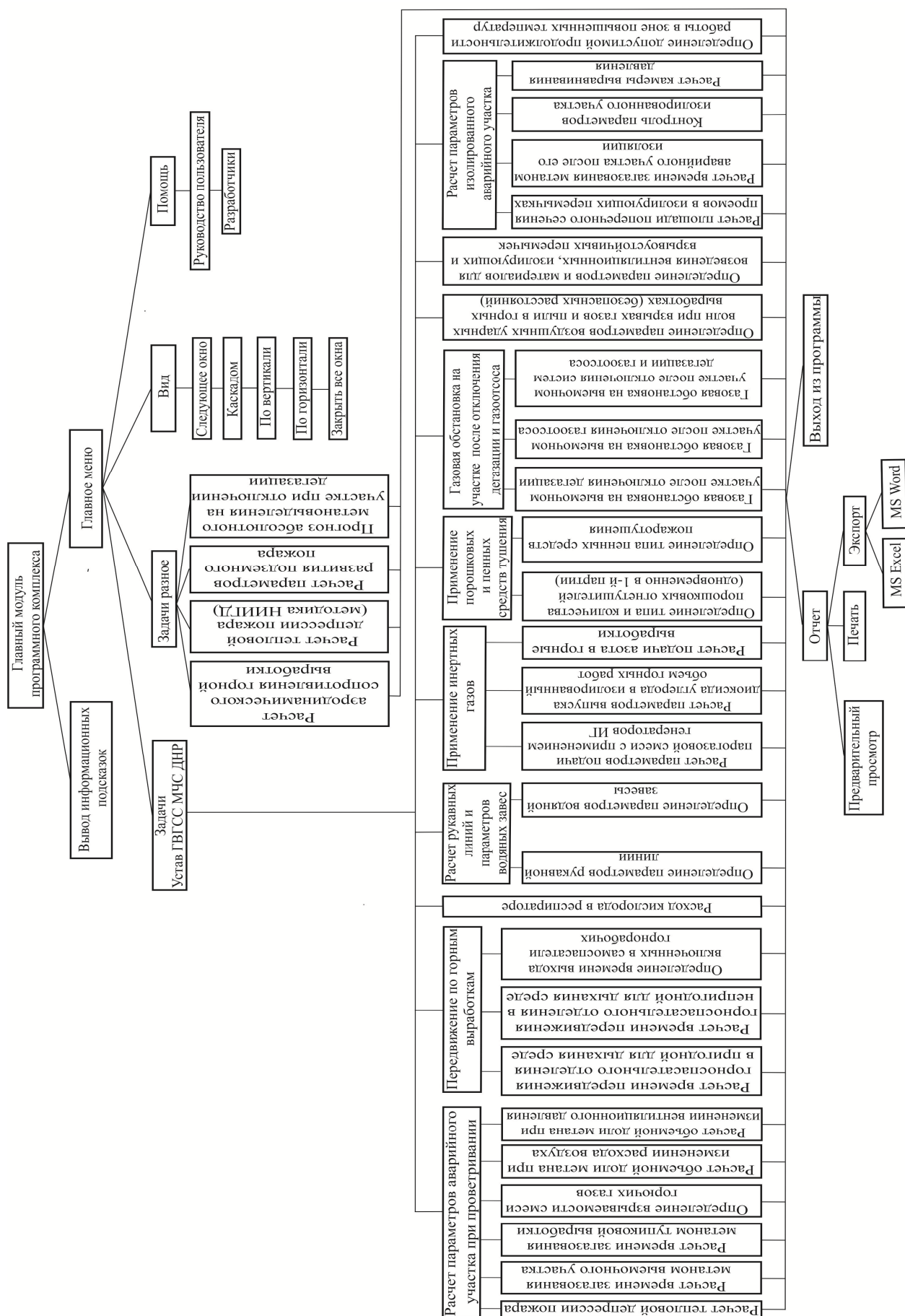


Рис. 1. Структура программного комплекса УАСПР

- «Задачи Устав» (состоит из перечня задач, изложенных в приложениях Устава ГВГСС МЧС ДНР);
- «Задачи разное» (методики и методы определения параметров аварийного характера, изложенных в действующей технической документации);
- «Вид» (выбирается настройка расположения окон программ внутри главного окна);
- «Помощь» (информация о разработчиках и электронная версия Руководства пользователя).

Для решения непосредственных задач разработано 33 отдельных программы, которые объединены в программный комплекс по следующим методикам Устава ГВГСС МЧС ДНР:

- расчет параметров аварийного участка при проветривании;
- определение времени передвижения горноспасательных отделений и горнорабочих по горным выработкам (рис. 2);
- определение расхода кислорода в респираторе;
- расчет рукавных линий и параметров водяных завес;
- применение инертных газов;
- применение порошковых и пенных средств тушения;
- газовая обстановка на участке после отключения дегазации и газоотсоса;
- определение параметров воздушных ударных волн при взрывах газов и пыли в горных выработках (безопасных расстояний);
- определение параметров и материалов для возведения вентиляционных, взрывоустойчивых и изолирующих перемычек;
- расчет параметров изолированного аварийного участка;
- определение допустимой продолжительности работы горноспасательных отделений в зоне повышенных температур.

Разработаны и включены в комплекс УАСПР дополнительные программы, методики выполнения которых изложены в научно-технической документации, используемой горноспасательной службой.

Для расчета времени передвижения горноспасательного отделения в не пригодной для дыхания среде необходимо ввести:

- название рассматриваемой горной выработки;
- вид выполняемой работы отделением;
- высоту рассматриваемого участка горной выработки;
- угол наклона рассматриваемого участка горной выработки;
- значение протяженности рассматриваемого участка;
- температуру воздуха рассматриваемого участка;
- видимость в задымленной среде;
- вид резерва кислорода в баллоне респиратора для непредвиденных случаев.

Расчет времени передвижения горноспасательного отделения в не пригодной для дыхания среде с учетом задымленности, температуры и пройденного р...

Файл Таблица Отчет

Расчет времени передвижения горноспасательного отделения в не пригодной для дыхания среде

Предприятие **ОП «Шахта «Шахтерская-Глубокая»** Участок **6-й вост. лава пласта h7**

№ п/п	Наименование выработки	Выполняемая работа	Высота выр-ки, м	Угол наклона выр-ки, град	Скорость передвиж., м/мин	Протяж. выр-ки, м	Темп. воздуха в выработке, °С	Видимость в выработке, м	k1	k2	Время передвиж., мин
1	6-й вост. вент. штрек	вниз при разведке	2,0	0	45	560	27...31	9...10	0,91	0,9	14,76
2	Монтажный ходок 6-й вост. лавы	вниз при разведке	2,0	16	28,3	125	27...31	9...10	0,91	0,9	5,39
3	6-й вост. конв. штрек	вниз при разведке	2,0	0	45	50	27...31	9...10	0,91	0,9	1,36
4	Конв. квершлаг пл. h7	вниз при разведке	2,0	9	34,8	300	27...31	9...10	0,87	0,9	10,58
5	Оказание помощи	оказание помощи пост-му	2,0	0	0	0	27...31	9...10	0,87	0,9	10,00
6	Конв. квершлаг пл. h7	вверх при разведке	2,0	9	33,4	300	27...31	9...10	0,87	0,9	11,47
7	6-й вост. конв. штрек	вверх при разведке	2,0	0	45	50	27...31	9...10	0,87	0,9	1,42
8	Монтажный ходок 6-й вост. лавы	вверх при разведке	2,0	16	25,1	125	27...31	9...10	0,84	0,9	6,38
9	6-й вост. вент. штрек	вверх при разведке	2,0	0	45	560	27...31	9...10	0,81	0,9	16,54

Выбор резерва кислорода

☒ Резерв кислорода 2 МПа (40 л)

☐ Резерв кислорода 5 МПа (100 л)

Расчет

Общее время передвижения: **77,90 мин**

Общее пройденное расстояние: 2070 м;

Общий расход кислорода: 154,30 л (38,56 %);

Примечание. Скорости передвижения отделений приведены без учета затоплений, загромождений и других факторов, осложняющих движение.

Рис. 2. Диалоговое окно программы расчета времени передвижения горноспасательных отделений в не пригодной для дыхания среде

После ввода исходных данных для определения общего времени передвижения горноспасательного отделения необходимо в окне программы нажать на кнопку «Расчет».

Дополнительно программа выполнит расчет общего пройденного отделением расстояния и расхода кислорода.

Программный комплекс УАСПР включает в себя следующие компоненты:

- программное обеспечение для решения поставленных задач;
- справочно-информационные данные для выполнения расчетов;
- генератор табличных отчетов;
- программу для вывода на печать результатов расчета, экспорта в MS Word, PDF и MS Excel.

Выводы. Проведенные исследования и разработанный программный комплекс УАСПР позволяют выполнять необходимые расчеты при ведении аварийно-спасательных работ, составлении оперативных планов мероприятий по локализации и ликвидации последствий аварий на опасных производственных объектах и принимать оперативные решения руководителем горноспасательных работ для ликвидации аварий и спасения людей.

Список литературы / References

1. Комплекс программ для решения задач проветривания шахт в нормальных и аварийных условиях / П.С. Пашковский, М.В. Кравченко, Н.М. Кравченко, Б.В. Бокий // 10-я сессия Международного Бюро по Горной Теплофизике (14–18.02.2005). – Гливице, Польша, 2005. – С. 565 – 574.

Pashkovskiy, P.S., Kravchenko, M.V., Kravchenko, N.M., Bokiyy, B.V. *Kompleks programm dlya resheniya zadach provetrivaniya shakht v normal'nykh i avariynykh usloviyakh* [Complex of programs for solving the mine ventilation problems in standard and emergency conditions]. *10-ya sessiya Mezhdunarodnogo Byuro po Gornoy Teplofizike (14–18.02.2005)* [The 10th session of International Bureau on Mining Thermal Physics (14–18.02.2005)]. Gliwice, Poland, 2005, pp. 565 – 574.

2. Решетников, И.А. Совершенствование программного продукта «Электронный план ликвидации аварий» / И.А. Решетников // Проблемы разработки месторождений углеводородных и рудных полезных ископаемых. – 2014. – № 1. – С. 408 – 410.

Reshetnikov, I.A. *Sovershenstvovaniye programmnoy produkta “Elektronnyy plan likvidatsii avariyy”* [Upgrade of the software “Electronic plan of accident elimination”]. *Problemy razrabotki mestorozhdeniy uglevodorodnykh i rudnykh poleznykh iskopayemykh – Problems of mining the hydrocarbon and metallic mineral deposits*, 2014, no. 1, pp. 408 – 410.

3. Кормщиков, Д.С. Разработка и совершенствование программного продукта «Электронный план ликвидации аварии» / Д.С. Кормщиков // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сессии Горного института УрО РАН по результатам НИР в 2011 г. – Пермь, 2012. – С. 278 – 280.

Kormshchikov, D.S. *Razrabotka i sovershenstvovaniye programmnoy produkta “Elektronnyy plan likvidatsii avarii”* [Development and upgrade of the software “Electronic plan of accident elimination”]. *Strategiya i protsessy osvoeniya georesursov: materialy yezhegod. nauch. sessii Gornogo instituta UrO RAN po rezul'tatam NIR v 2011 g.* [Strategy and processes of development of geological resources: materials of the annual scientific session of the Mining institute of the Russian Academy of Sciences (Ural Branch) on scientific research results in 2011]. Perm, 2012, pp. 278 – 280.

4. Агеев, В.Г. На страже безопасности жизни и здоровья граждан / В.Г. Агеев // Научный вестник НИИГД «Респиратор»: юбилейный выпуск: 1968 – 2018. – Донецк, 2019. – С. 3 – 12.

Ageyev, V.G. *Na strazhe bezopasnosti zhizni i zdorov'ya grazhdan* [Safeguarding public safety and health]. *Nauchnyy vestnik NIIGD “Respirator”: yubileynyuy vypusk: 1968 – 2018* [Scientific bulletin of the NIIGD “Respirator”: anniversary issue: 1968 – 2018]. Donetsk, 2019, pp. 3 – 12.

5. Агарков, Ал.В. Об аварийности в угольных шахтах и применении системы дистанционного контроля состава шахтной среды при проведении горноспасательных работ / Ал.В. Агарков // Инновационные технологии

разработки месторождений полезных ископаемых: сб. науч. тр. – Донецк: ДонНТУ, 2019. – № 5. – С. 294 – 313.

Agarkov, Al.V. *Ob avariynosti v ugol'nykh shakhtakh i primenenii sistemy distantсионного kontrolya sostava shakhtnoy sredy pri provedenii gornospasatel'nykh rabot* [On accident rate in coal mines and application of the remote system of monitoring the mine environment composition during carrying-out the mine-rescue operations]. *Innovatsionnyye tekhnologii razrabotki mestorozhdeniy poleznykh iskopayemykh: sb. nauch. tr.* [Innovation technologies of mining the mineral deposits: collection of scientific works]. Donetsk, DonNTU Press, 2019, no. 5, pp. 294 – 313.

6. Левин, Л.Ю. Моделирование газораспределения в горных выработках рудников при авариях / Л.Ю. Левин, Д.С. Кормщиков // Горное эхо. – 2012. – № 4. – С. 14 – 17.

Levin, L.Yu., Kormshchikov, D.S. *Modelirovaniye gazoraspredeleniya v gornykh vyrabotkakh rudnikov pri avariyaх* [Simulation of gas spreading in mine workings of mines during accidents]. *Gornoye ekho – Mining echo*, 2012, no. 4, pp. 14 – 17.

7. Палеев, Д.Ю. Совершенствование подготовки планов ликвидации аварии с использованием программных комплексов «Вентиляция», «Ударная волна» и «Водоснабжение» / Д.Ю. Палеев, О.Ю. Лукашов // Горный информационно-аналитический бюллетень: отдельный выпуск / Ин-т угля СО РАН. – М.: Горная книга, 2013. – № ОБ6. – С. 227 – 237.

Paleyev, D.Yu., Lukashov, O.Yu. *Sovershenstvovaniye podgotovki planov likvidatsii avarii s ispol'zovaniyem programmnykh kompleksov “Ventilyatsiya”, “Udarnaya volna” i “Vodosnabzheniye”* [Improvement of preparation of accident elimination plans using the “Ventilation”, “Shock wave” and “Water supply” software suites]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten': ot-del'nyy vypusk / In-t uglya SO RAN* [Mining information and analytical bulletin: special issue / Institute of Coal of the Russian Academy of Sciences (Siberian branch)]. Moscow, Gornaya kniga Publ., 2013, no. OB6, pp. 227 – 237.

Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук С.П. Грековым
Дата поступления рукописи 23.01.2020

*Aleksandr Viktorovich Mavrodi, advanced engineer; e-mail: mavrodi-av@mail.ru;
Vladimir Vladimirovich Zakhlebin, engineer of the 1st category; e-mail: avarvent@mail.ru
The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,
Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR
283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-34*

SOFTWARE FOR MINE-RESCUE OPERATIONS

Purpose. To develop the software suite to solve the tasks on management of emergency rescue operations on personal electronic computers by the State Para-military Mine-rescue Service.

Methods. Analysis and generalization of investigations of methods for accident development parameters prediction and of methods of their elimination at mining enterprises.

Results. The software suite has been created that allows executing the multiple-choice calculations and providing the data for choosing the most effective methods and means of elimination of the accidents (fighting the fires, sequence of sealing the accident district, its inertisation, prediction of gas situation in the district) efficiently, as well as determining the sequence of actions of the mine-rescue subdivisions by the chief of the mine-rescue operations for fast and safe completion of the operations to eliminate the accident using the personal electronic computers with visual presentation of the results in the form of diagrams, nomograms and tables.

Scientific novelty. The developed software suite makes it possible to solve the tactical and operational tasks on management of the emergency rescue operations by the State Para-military Mine-rescue Service of the Ministry of the Donetsk People’s Republic for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters.

Practical value. The YACIP software suite is intended for solving the tasks on the emergency rescue operations management by the mine-rescue subdivisions. It permits to execute the complicated multiple-choice calculations on the personal electronic computers promptly in the conditions of carrying-out the emergency rescue operations and during the development of technical documentation for mining enterprises.

Keywords: *coal mine; working area; emergency rescue operations; software suite; calculation methodology; initial data; calculation on the personal electronic computer; mine-rescue service.*

УДК [622.822.22:622.693.26]:001.891.573

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

Олег Петрович Пашковский, мл. науч. сотр.; e-mail: kingston-4@mail.ru

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

ПОЖАРОБЕЗОПАСНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ПОРОДНОГО ОТВАЛА СО СЛОЯМИ ГЛИНЫ

Цель. Теоретические и экспериментальные исследования для определения пожаробезопасных параметров породных отвалов со слоями глины для предотвращения их самонагрева и самовозгорания.

Методика. Математическое моделирование температуры породного отвала.

Результаты. Определены закономерности формирования породного отвала со слоями глины. Разработана математическая модель тепломассообменных процессов между слоями глины. Получены численные решения задачи и установлены пожаробезопасные расстояния между слоями глины, при которых исключено самовозгорание.

Научная новизна. Впервые разработана математическая модель процесса самовозгорания отвальной массы, позволяющая выполнить математическое моделирование процессов самовозгорания по высоте плоского террикона.

Практическая значимость. Использование численного метода расчета позволяет установить пожаробезопасные параметры породного отвала.

Ключевые слова: породный отвал; уголь; пирит; слои глины; расстояние между слоями; термодиффузия.

Постановка проблемы. Существующие способы подземной добычи угля связаны с образованием на поверхности земли породных отвалов. Ежегодно в процессе подземной добычи угля на поверхность поднимают миллионы кубометров породы и образуются отвалы. За многие годы разработки угольных месторождений образовались в России, Украине и ДНР тысячи терриконов.

Вредное воздействие терриконов на окружающую среду связано с тем, что наличие в породных отвалах пирита и угля вызывает их самовозгорание с выделением в атмосферу вредных газов и пыли, вплоть до взрыва терриконов. Для предотвращения самовозгорания в породном отвале предложен способ изоляции слоёв пород слоями глины.

Анализ последних исследований. Горение породных отвалов отрицательно сказывается на экологии городов и поселков. Несмотря на наличие методик расчетов количества концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ и определения поля температур тепловизорами [1], а также достаточного количества работ по изучению условий самонагрева и возгорания горных пород [2, 3], требуется глубокое изучение процессов самонагрева и самовозгорания породных отвалов с целью уменьшения количества выбросов вредных веществ в атмосферу.

Цель работы. Проведение теоретических и экспериментальных исследований для определения пожаробезопасных параметров формирования породных отвалов со слоями глины с целью предотвращения их самонагрева и самовозгорания.

Материалы и результаты исследований. Представим плоский породный отвал как скопление кусков породы и частиц угля, в котором для предотвращения самовозгорания расположены горизонтально слои глины (рис. 1).

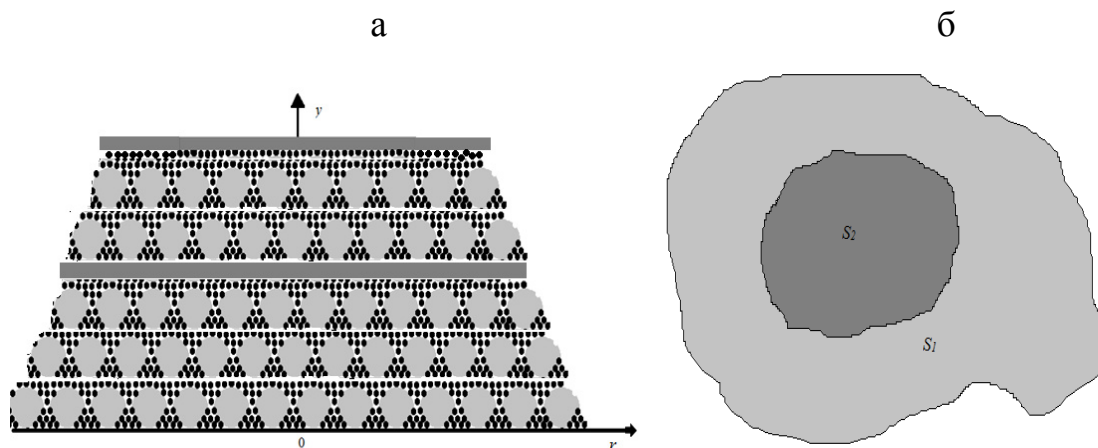


Рис. 1. Схема породного отвала: а – вид сбоку; б – вид сверху

Как видно, высота и ширина породного отвала может быть произвольной. При этом количество слоёв глины и их толщину определяют расчётным путём.

Для описания процессов теплообмена в породном отвале с учётом испарения влаги из частиц угля используем уравнение теплопроводности в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) + \frac{q_1 k_1 Z}{\rho_y c_y} \exp \left(-\frac{E_1}{RT} \right) - \frac{q_2 k_2 U}{\rho_y c_y} \exp \left(-\frac{E_2}{RT} \right), \quad (1)$$

где T – температура внутри породного отвала, К;

T_0 – температура окружающей среды, К;

τ – время с момента начала процесса, с;

r – радиус с центром на оси цилиндра, м;

y – координата по высоте породного отвала, отсчитываемая от основания, м;

a – коэффициент температуропроводности угля, м²/с;

q_1 – теплота реакции окисления пирита и угля, Дж/моль;

q_2 – теплота испарения влаги, Дж/моль;

ρ_y – плотность пирита и угля, кг/м³;

c_y – удельная теплоёмкость пирита и угля, Дж/(кг·К);

U – концентрация влаги в угле, моль/м³;

k_1 – константа скорости химической реакции при начальной температуре T_0 , с⁻¹;

k_2 – константа скорости испарения влаги при начальной температуре T_0 , с⁻¹;

E_1 – энергия активации при химической реакции, Дж/моль;

E_2 – энергия активации при испарении влаги, Дж/моль;

R – газовая постоянная, Дж/(К·моль);

Z – концентрация кислорода в отвале, моль/м³.

Упростим вид уравнения (1), введя безразмерную температуру, и получим

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \bar{T}}{\partial r} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) + A_1 \bar{Z} \exp(-\bar{E}_1 / \bar{T}) - A_2 \bar{U} \exp(-\bar{E}_2 / \bar{T}), \quad (2)$$

где $\bar{T} = T/T_0$ – безразмерная температура;

$\bar{Z} = Z/Z_0$ – безразмерная концентрация кислорода;

$\bar{U} = U/U_0$ – безразмерная концентрация влаги;

Z_0 – начальная концентрация кислорода, моль/м;

U_0 – начальная концентрация влаги, моль/м;

$A_1 = \frac{q_1 k_1 Z_0}{\rho_y c_y T_0}$ – относительная теплота реакции окисления пирита и угля, $с^{-1}$;

$A_2 = \frac{q_2 k_2 U_0}{\rho_y c_y T_0}$ – относительная теплота испарения влаги с поверхности частиц угля, $с^{-1}$;

$\bar{E}_1 = E_1/RT_0$ – безразмерная энергия активации при химической реакции;

$\bar{E}_2 = E_2/RT_0$ – безразмерная энергия активации при испарении влаги.

К уравнению (2) добавим начальное и граничные условия. Начальным условием будет

$$\bar{T}(r, y, 0) = 1. \quad (3)$$

Граничные условия для уравнения (2) следующие:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \bar{T}(0, y, \tau)}{\partial r} &= 0; \\ \bar{T}(r_m, y, \tau) &= 1; \bar{T}(r, 0, \tau) = 1; \\ \frac{\partial \bar{T}(r, h, \tau)}{\partial y} &= \frac{\alpha}{\lambda} [1 - \bar{T}(r, h, \tau)], \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где r_m – максимальный радиус породного отвала, м;

h – высота породного отвала, м;

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

α – коэффициент теплообмена, зависящий от проницаемости воздуха в породный отвал, Вт/(м²·К).

При больших радиусах, например, плоских породных отвалов упростим уравнение (2) и приведём его к виду

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial \tau} = a \left(\frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 \bar{T}}{\partial y^2} \right) + A_1 \bar{Z} \exp(-\bar{E}_1 / \bar{T}) - A_2 \bar{U} \exp(-\bar{E}_2 / \bar{T}). \quad (5)$$

Анализ полученного уравнения (5) показывает, что изменение температуры в породном отвале происходит в результате термодиффузии теплоты по высоте и по радиусу породного отвала (первое слагаемое в правой части), а также под действием возникающей теплоты реакции окисления пирита и угля, которая усиливается по высоте (второе слагаемое). В то же время испарение влаги с поверхности угля (третье слагаемое) приводит к уменьшению температуры.

Уравнение (5) является нелинейным и невозможно получить аналитическое его решение. Поэтому будем искать решение уравнения (5) численным методом, для чего представим его в конечных разностях

$$\frac{\Delta \bar{T}}{\Delta \tau} = a \left(\frac{\Delta^2 T}{\Delta r^2} + \frac{\Delta^2 \bar{T}}{\Delta y^2} \right) + A_1 \bar{Z} \exp(-\bar{E}_1 / \bar{T}) - A_2 \bar{U} \exp(-\bar{E}_2 / \bar{T}). \quad (6)$$

Примем за m номер узла сетки при условном разбиении отрезка в направлении по высоте породного отвала, а за n номер узла по времени. На рис. 2 представлено условное разбиение пространства (y, τ) на отрезки.

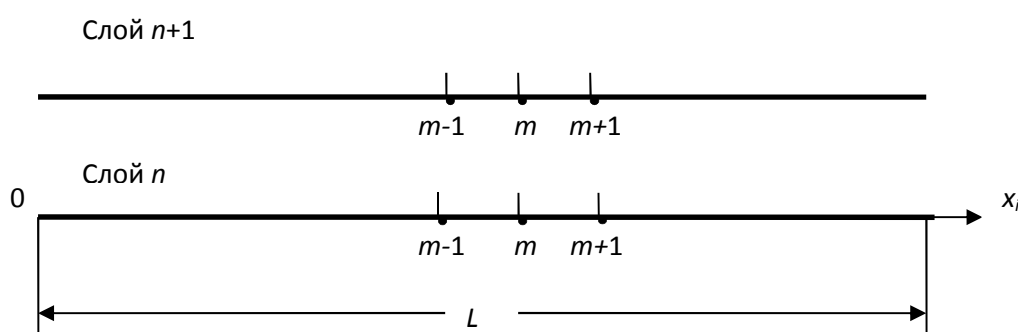


Рис. 2. Номера узлов по высоте породного отвала и по времени

В результате уравнение (6) примет вид

$$\begin{aligned} \bar{T}_{m,n+1} = & \bar{T}_{m,n} + \frac{2a\Delta\tau}{(R - n\Delta y / \operatorname{tg}\alpha)^2} (1 - \bar{T}_{m,n}) + \frac{a\Delta\tau}{\Delta y^2} (\bar{T}_{m-1,n} - 2\bar{T}_{m,n} + \bar{T}_{m+1,n}) + \\ & + \bar{Z}\Delta\tau \exp(-\bar{E}_1 / \bar{T}_{m,n}) - A_2 \bar{U}\Delta\tau \exp(-\bar{E}_2 / \bar{T}_{m,n}), \end{aligned} \quad (7)$$

где $\bar{T}_l$ и $\bar{T}_n$ – относительные температуры на левой и правой стороне склона отвала, которые можно принять при контакте с наружным воздухом; $\bar{T}_l = \bar{T}_n = 1$.

Кроме того, шаг по радиусу должен зависеть от угла склона и быть равен

$$\Delta r = R - y / \operatorname{tg}\alpha, \quad (8)$$

где R – радиус террикона у основания, м;

α – угол склона отвала, ...°.

Очевидно, при высоте террикона, равной $h = R \operatorname{tg} \alpha$, он из плоского становится коническим.

Условием устойчивого счёта на ЭВМ должно быть требование, чтобы число Пекле

$$\operatorname{Pe} = a \Delta \tau / (1 / R_1^2 + 1 / \Delta y^2) < 1 / 2, \quad (9)$$

где R_1 – радиус площади поверхности отвала, м.

Начальным условием для уравнения (8) будет согласно (3) условие

$$\bar{T}_{m,0} = 1. \quad (10)$$

Граничными условиями для уравнения (7) будут условия

$$\bar{T}_{0,n} = 1; \quad \bar{T}_{M,n} = \frac{\bar{T}_{M-1,n} + \alpha \Delta y / \lambda}{1 + \alpha \Delta y / \lambda}, \quad (11)$$

где M – номер узла на поверхности породного отвала.

Анализ второго граничного условия показывает, что при малой интенсивности теплообмена с внешней средой ($a = 0$) на поверхности породного отвала температура будет равна той, что и на некоторой глубине. В то же время при интенсивном теплообмене с внешней средой температура на поверхности отвала будет равна температуре воздуха.

При расчётах температуры в слоях глины по формуле (7) следует принимать $A_1 = A_2 = 0$, так как здесь отсутствуют процессы термодеструкции.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса самовозгорания отвальной массы позволяет производить численные расчёты и моделировать указанные процессы.

Разработанная математическая модель процесса самовозгорания отвальной массы позволила выполнить математическое моделирование процессов самовозгорания по высоте плоского террикона при отсутствии и наличии слоев глины между слоями пород.

На рис. 3 представлены результаты моделирования распределения температуры по высоте породного отвала в различное время с момента начала самовозгорания при $R_1 > \Delta r$ и отсутствии слоев глины.

При расчётах на ЭВМ при отсутствии слоёв глины принято $\operatorname{Pe} = 0,4$; $A_1 = 0,1$; $A_2 = 0,05$; $E_1/RT_0 = 1$; $E_2/RT_0 = 0,5$; $\alpha \Delta y / \lambda = 1$. Как видно из рис. 3, со временем температура в породном отвале возрастает и может достичь при заданных параметрах при $20y/H = 5, 10$ и 15 значения $T/T_0 = 3,7$, что в градусах Цельсия будет равно примерно 800°C .

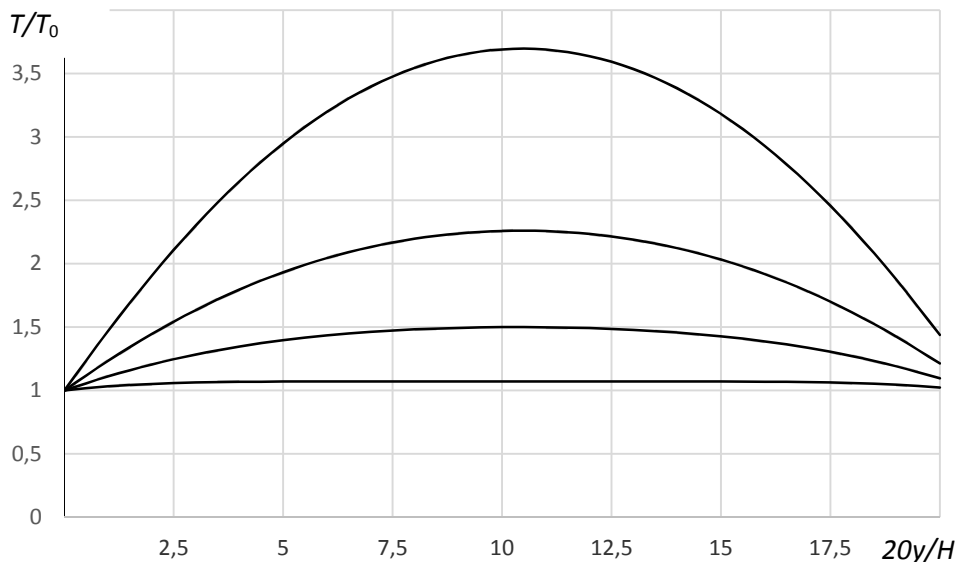


Рис. 3. Распределение температуры по высоте породного отвала в различное время с момента начала самовозгорания (количество шагов по времени $n = 10, 50, 100$ и 200 снизу вверх)

Дальнейшие расчёты показали, что при наличии трёх слоёв глины на расстояниях снизу вверх при $20y/H = 5, 10$ и 15 можно существенно снизить температуру в породном отвале и довести её, как видно из рис.4, до значения $T/T_0 = 1,19$, что в градусах Цельсия будет равно примерно 60°C . При том принято $Pe = 0,01$; $A_1 = 0$; $A_2 = 0$; $E_1/RT_0 = 1$; $E_2/RT_0 = 0,5$; $\alpha\Delta y/\lambda = 1$ в слоях глины. Это будет указывать, что при наличии в породном отвале слоёв глины самовозгорания не происходит.

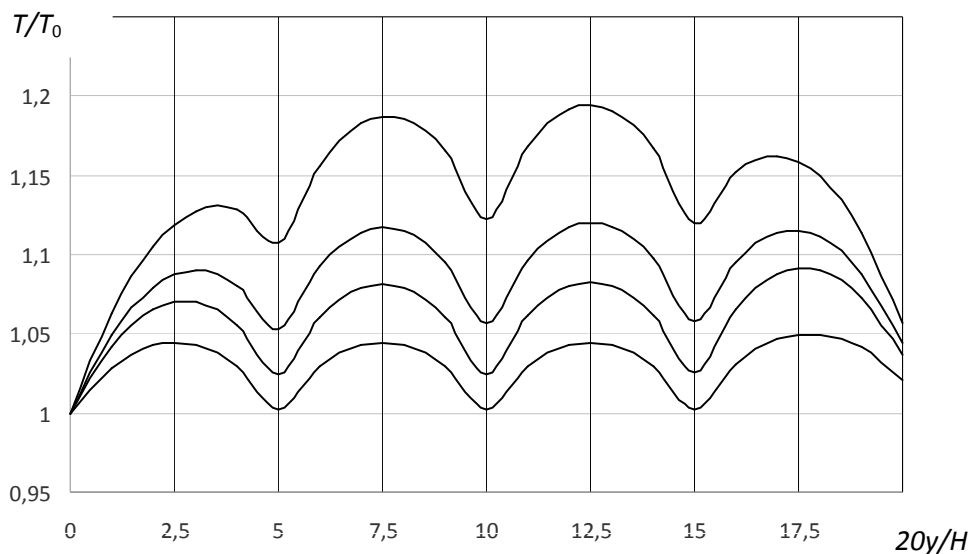


Рис. 4. Распределение температуры по высоте породного отвала с тремя слоями глины при $20y/H = 5, 10$ и 15 в различное время с момента начала самовозгорания (количество шагов по времени $n = 10, 50, 100$ и 200 снизу вверх)

Так, если принять шаг по высоте породного отвала равным $\Delta y = 2,5$ м, то это будет указывать, что между слоями глины можно принять расстояние 10 м, а толщину слоя глины взять равной $0,5 \dots 1,0$ м.

Таким образом, разработанная математическая модель процесса самовозгорания отвальной массы позволила выполнить математическое моделирование процессов самовозгорания по высоте плоского террикона при отсутствии и при наличии слоев глины между слоями пород.

Выводы. Разработана математическая модель процесса самовозгорания отвальной массы, которая позволила выполнить математическое моделирование процессов самовозгорания по высоте плоского террикона при отсутствии и при наличии слоев глины между слоями пород.

Расчёты численным методом показали, что при наличии трёх слоёв глины можно существенно снизить температуру в породном отвале и довести её примерно до 60°C . Это будет указывать, что при наличии в породном отвале слоёв глины самовозгорания не происходит.

Список литературы / References

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

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

2. Панов, Б.С. Неоминерализация горящих угольных отвалов Донбасса / Б.С. Панов // Минералогический журн. – 2000. – Т. 22, № 4. – С. 37 – 46.

Panov, B.S. *Neomineralizatsiya goryashchikh ugol'nykh otvalov Donbassa* [Neomineralization of burning coal waste rock piles of the Donets basin]. *Mineralogicheskiy zhurnal – Mineralogical journal*, 2000, vol. 22, no. 4, pp. 37 – 46.

3. Панов, Б.С. Модель самовозгорания породных отвалов угольных шахт Донбасса / Б.С. Панов, Ю.А. Проскурня // Геология угольных месторождений: межвуз. науч. тематич. сб. – Екатеринбург, 2002. – С. 274 – 281.

Panov, B.S., Proskurnya, Yu.A. *Model' samovozgoraniya porodnykh otvalov ugol'nykh shakht Donbassa* [Model of spontaneous combustion of waste rock piles of Donbass coal mines]. *Geologiya ugol'nykh mestorozhdeniy: mezhvuz. nauch. tematich. sb.* [Geology of coal deposits: interuniversity scientific and subject collection]. Yekaterinburg, 2002, pp. 274 – 281.

Igor Nikolayevich Zinchenko, Cand. Sci. (Tech.), senior scientific associate; e-mail: zinstar@mail.ru;

Oleg Petrovich Pashkovskiy, junior scientific associate; e-mail: kingston-4@mail.ru

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

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

FIRE-SAFE PARAMETERS OF A WASTE ROCK PILE WITH CLAY LAYERS

Purpose. Theoretical and experimental investigations for determination of the fire-safe parameters of the waste rock piles with the clay layers for prevention of their spontaneous heating and spontaneous combustion.

Methodology. Mathematical modeling of the waste rock pile temperature.

Results. The regularities of formation of the waste rock pile with the clay layers have been determined. The mathematical model of the heat and mass exchange processes between the clay layers has been developed. The numerical solutions of the problem have been obtained, and the fire-safe distances eliminating the spontaneous combustion between the clay layers have been established.

Scientific novelty. For the first time the mathematical model of the spontaneous combustion process of the waste rock pile has been developed that enables the mathematical modeling of the spontaneous combustion processes to be carried out along the height of a flat spoil heap.

Practical value. The application of the numerical method of computation makes it possible to establish the fire-safe parameters of the waste rock pile.

Keywords: waste rock pile; coal; pyrite; clay layers; distance between the layers; thermal diffusion.

УДК 614.8"363":504.5

Виталий Георгиевич Попов, канд. хим. наук, науч. сотр.; e-mail: v.g.popov.donetsk@gmail.com
Государственный научно-исследовательский институт горноспасательного дела,
пожарной безопасности и гражданской защиты «Респиратор» МЧС ДНР
283048, Донецк, ул. Артема, 157. Тел. (+38 062) 332-78-43

ВРЕДНЫЕ ВЕЩЕСТВА В АЭРОЗОЛЯХ РАСТВОРОВ КИСЛОТ ДЛЯ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ГАЗООБРАЗНОГО АММИАКА

Цель. Изучение возможности превышения предельно допустимых концентраций вредных веществ в аэрозолях водных растворов кислот, распыленных для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака.

Методика. Аналитические исследования и математическая обработка данных из литературных источников.

Результаты. С помощью уравнений химических реакций рассчитаны минимальные концентрации распыленных кислот в воздухе, необходимые для снижения концентрации газообразного аммиака на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ за счет его нейтрализации этими кислотами. Также рассчитаны концентрации в воздухе солей аммония, образующихся при снижении концентрации газообразного аммиака на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ за счет его нейтрализации распыленными кислотами.

Найдено, что распыление растворов кислот, предложенных ранее в литературных источниках для нейтрализации газообразного аммиака, в концентрациях, необходимых для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака, может привести к превышению предельно допустимых концентраций вредных веществ (кислот и образующихся солей аммония) в аэрозолях.

Научная новизна. Расчеты по уравнениям химических реакций впервые использованы для определения возможных концентраций вредных веществ в аэрозолях растворов кислот, распыленных для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях.

Практическая значимость. Результаты работы способствуют недопущению поражения людей вредными веществами в аэрозолях водных растворов кислот, применяемых для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях.

Ключевые слова: аммиачно-воздушные облака; обеззараживание; жидкостные завесы; аэрозоли; кислоты; соли аммония; превышение предельно допустимых концентраций.

Постановка проблемы

Аммиак NH_3 относится к аварийно химически опасным веществам (далее – АХОВ). В настоящей работе использованы действующие в Донецкой Народной Республике и Российской Федерации нормативно-технические документы (НТД). Значения предельно допустимых концентраций вредных веществ, в том числе аммиака, в воздухе рабочей зоны, которые далее обозначены ПДК.

Аммиак используют и хранят на химически опасных объектах Донецкой Народной Республики. Для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков, образующихся при химических авариях с выбросом газообразного или проливом сжиженного аммиака, рекомендовано применять водяные завесы или жидкостные завесы распыленных водных растворов кислот. Как отмечено в работе [1], водяные завесы поглощают только до 15 % газообразного аммиака, поэтому для нейтрализации аммиака более эффективно использовать растворы кислот, при взаимодействии с которыми аммиак образует малолетучие водорастворимые соли аммония.

Для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков в аварийных условиях предложено использовать распыленные водные растворы лимонной [2], а также соляной, уксусной, щавелевой кислот. Кроме того, в работе [2] сообщено о возможности эффективной нейтрализации газообразного аммиака распыленными водными растворами винной и 1-оксиэтилидендифосфоновой кислот. В статье [3] рассмотрено обеззараживание аммиачно-воздушного облака распыленным водным раствором серной кислоты. Для очистки от аммиака отходящих газов и вентиляционных выбросов промышленных предприятий применяли (в абсорберах) водные растворы ортофосфорной, серной, азотной кислот.

При обеззараживании аммиачно-воздушных облаков распыленными растворами кислот последние реагируют с аммиаком и тем самым нейтрализуют данное АХОВ. Но при этом в аэрозолях, нейтрализующих аммиак, содержатся другие вредные для человека вещества: вышеуказанные кислоты, а также продукты их взаимодействия с аммиаком (соли аммония). Наличие этих вредных веществ необходимо учитывать при использовании водных растворов кислот, когда ставят жидкостные завесы с целью обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака.

Анализ последних исследований

Авторы работы [3] и соответствующие НТД не акцентируют внимания на вредных свойствах аэрозолей водных растворов кислот, предложенных в этих же работах для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях. В работе [2] установлено, что распыление в специализированной камере объемом 2,3 м³ водного раствора лимонной кислоты с массовой долей 20 % защищает находящихся в этой камере животных от отравления парами аммиака. Вместе с тем приведенная в диссертации [2] инструкция по применению указанного раствора требует исключить попадание лимонной кислоты на слизистые оболочки и кожу человека. В справочнике [4] в качестве меры первой доврачебной помощи при ингаляционном поражении человека аммиаком рекомендовано вдыхание теплых водяных паров с добавкой уксусной или лимонной кислоты. При этом уксусная кислота (в форме пара) и лимонная кислота (в форме аэрозоля) – умеренно опасные вредные вещества, тогда как нейтрализуемый ими аммиак относится к малоопасным вредным веществам.

В связи с вышеизложенным актуально изучение возможности превышения ПДК вредных веществ в аэрозолях водных растворов кислот, распыленных для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака. Сведения о таких исследованиях в литературных источниках отсутствуют.

Цель исследований

Изучение возможности превышения ПДК вредных веществ в аэрозолях водных растворов кислот, распыленных для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака.

Материалы и результаты исследований

Продукты нейтрализации аммиака кислотами в действующих НТД и работах [2, 4] не указаны. Запишем в общем виде уравнение реакции нейтрализации аммиака кислотой H_nA :



где n – целочисленный коэффициент (индекс);

A – общее обозначение кислотного остатка.

Максимально возможные значения n равны:

- для одноосновных кислот (например, уксусной, соляной, азотной) $n = 1$;
- для двухосновных кислот (например, серной, щавелевой, винной) $n = 2$;
- для трехосновных кислот (например, ортофосфорной, лимонной) $n = 3$;
- для четырехосновной оксиэтилидендифосфоновой кислоты $n = 4$.

При нейтрализации аммиака избытком любой кислоты в растворе $n = 1$, при этом многоосновные кислоты образуют кислые соли аммония.

Массу кислоты m_K , г, реагирующей согласно уравнению (1) с аммиаком массой m_A , г, можно найти с помощью уравнения

$$m_K = \frac{m_A M_K}{n M_A}, \quad (2)$$

где M_K – молярная масса кислоты, г/моль;

M_A – молярная масса аммиака, г/моль.

Для аммиачно-воздушной смеси

$$m_A = V_A C_A, \quad (3)$$

где V_A – объем смеси, м³;

C_A – концентрация аммиака в смеси, г/м³.

Распыление кислоты массой m_K в объеме воздуха V_B , м³, создает концентрацию кислоты C_K , г/м³. Учитывая уравнения (2) и (3):

$$C_K = C_A \frac{V_A M_K}{V_B n M_A}. \quad (4)$$

Примем $V_A = V_B$; $C_A = C_A^{\text{ПДК}} = 2 \cdot 10^{-2}$ г/м³. Тогда

$$C_K = C_A^{\text{ПДК}} \frac{M_K}{n M_A}. \quad (5)$$

Таким образом, концентрация C_K создается в воздухе при распылении минимального количества кислоты, необходимого для снижения концентрации

газообразного аммиака на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ за счет его нейтрализации данной кислотой согласно уравнению (1).

В табл. 1 приведены найденные по уравнению (5) значения C_K . Все они превышают ПДК соответствующих кислот $C_K^{\text{ПДК}}$. Количества нейтрализующих веществ, реально необходимые для поглощения газов жидкостными завесами, обычно превышают результаты расчетов по уравнениям химических реакций [5]. Следовательно, если любая из указанных в табл. 1 кислот будет распылена в воздухе в концентрации, необходимой для снижения концентрации газообразного аммиака на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ за счет его нейтрализации данной кислотой согласно уравнению (1), но по какой-либо причине не прореагирует с аммиаком, то ПДК этой кислоты в аэрозоле будет превышена. В аммиачно-воздушных облаках, образующихся при химических авариях, концентрация аммиака может значительно превышать его ПДК ($2 \cdot 10^{-2}$ г/м³).

Таблица 1

Минимальные концентрации распыленных кислот в воздухе C_K , необходимые для снижения концентрации газообразного аммиака на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ за счет его нейтрализации этими кислотами согласно уравнению (1)

Кислота	ПДК кислоты $C_K^{\text{ПДК}} \cdot 10^3$, г/м ³	Класс опасности кислоты	n в уравнении (1)	$C_K \cdot 10^2$, г/м ³	$\frac{C_K}{C_K^{\text{ПДК}}}$
Соляная	5*	2	1	4,3	8,6
Уксусная	5	3	1	7,1	14
Азотная	2	3	1	7,4	37
Винная	3	3	1	17,6	59
			2	8,8	29
Ортофосфорная	1,38**	2	1	11,5	83
			3	3,8	28
Серная	1	2	1	11,5	115
			2	5,8	58
Оксиэтилиден-дифосфоновая	2	3	1	24,2	121
			4	6,0	30
Щавелевая	0,714***	2	1	10,6	148
			2	5,3	74
Лимонная	1	3	1	22,6	226
			3	7,5	75

* В пересчете на хлористый водород.

** В пересчете на фосфорный ангидрид ПДК равна $1 \cdot 10^{-3}$ г/м³.

*** Для дигидрата $C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O$ ПДК равна $1 \cdot 10^{-3}$ г/м³.

Значения $n > 1$ в табл. 1 отвечают условиям, когда распыленная кислота полностью нейтрализуется аммиаком. В аварийных условиях практически невозможно распылить раствор кислоты в количестве, строго соответствующем количеству подлежащего нейтрализации аммиака. При избытке аммиака в каплях жидкостной завесы $n > 1$, но эффективность нейтрализации аммиака такой завесой снизится из-за недостатка кислоты. При избытке кислоты в каплях нейтрализующей аммиак жидкостной завесы $n = 1$.

В качестве примера рассмотрим аэрозоли указанных в табл. 1 кислот, способные снизить концентрацию газообразного аммиака от значения, превышающего ПДК аммиака в 12,5 раз (ингаляционное воздействие аммиака в такой концентрации в течение 60 мин соответствует поражающей токсодозе [6]), до уровня ПДК аммиака, то есть на $0,23 \text{ г/м}^3$. Примем, что снижение концентрации газообразного аммиака происходит только за счет его реакции с распыленной кислотой согласно уравнению (1) при $n = 1$. Тогда по данным табл. 1 находим, что концентрации кислот в рассматриваемых аэрозолях (до их взаимодействия с аммиаком) превышают ПДК этих кислот не менее чем в 99 раз, а для лимонной кислоты – в 2600 раз. При этом указанные в табл. 1 кислоты (в форме паров или аэрозолей) – высокоопасные или умеренно опасные вредные вещества, а нейтрализуемый ими аммиак относится к малоопасным вредным веществам.

Таким образом, распыление растворов указанных в табл. 1 кислот в концентрациях, необходимых для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака, может привести к превышению ПДК этих кислот в аэрозолях, если распыленные кислоты не полностью нейтрализуются аммиаком (например, из-за недостаточной скорости абсорбции аммиака или неудачного расположения распылителей).

Для выбора кислоты, являющейся оптимальным средством обеззараживания аммиачно-воздушных облаков путем постановки жидкостных завес при химических авариях, пока недостаточно экспериментальных данных. Согласно действующим НТД, для нейтрализации вредных веществ щелочного характера (к которым относится и аммиак) предпочтительнее использовать не соляную кислоту, а органические кислоты – щавелевую или уксусную, водные растворы которых менее агрессивны по отношению к конструкционным материалам и безопаснее в обращении с ними. По аналогичным соображениям автор работы [2] рекомендовал обеззараживать аммиачно-воздушные облака распыленным водным раствором органической лимонной кислоты. Однако значения $C_k/C_k^{\text{ПДК}}$ в табл. 1 для уксусной, щавелевой и лимонной кислот больше, чем для соляной кислоты. Кроме того, щавелевая, уксусная и лимонная кислоты в водных растворах слабее соляной кислоты, вследствие чего для обеспечения необходимой эффективности абсорбции аммиака могут потребоваться более высокие концентрации указанных органических кислот в аэрозолях, чем концентрация соляной кислоты.

При нейтрализации аммиака массой m_A согласно уравнению (1) образуется соль аммония $(\text{NH}_4)_n\text{A}$, массу которой m_C , г, можно найти с помощью уравнения

$$m_C = \frac{m_A M_C}{n M_A}, \quad (6)$$

где M_C – молярная масса соли аммония, г/моль.

Значение m_A для аммиачно-воздушной смеси находим по уравнению (3). Образование соли аммония массой m_C в объеме V_A создает концентрацию соли C_C , г/м³. Учитывая уравнения (3), (6) и принимая $C_A = C_A^{\text{ПДК}} = 2 \cdot 10^{-2}$ г/м³, получаем

$$C_C = C_A^{\text{ПДК}} \frac{M_C}{n M_A}. \quad (7)$$

В табл. 2 приведены найденные по уравнению (7) значения C_C . Все они превышают представленные в табл. 2 значения ПДК соответствующих солей $C_C^{\text{ПДК}}$ (при отсутствии ПДК солей аммония приведены ПДК натриевых солей тех же кислот). Следовательно, снижение концентрации газообразного аммиака на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ за счет его нейтрализации распыленными кислотами, указанными в табл. 2, сопряжено с образованием солей аммония, концентрации которых в аэрозолях могут превысить их ПДК. В аммиачно-воздушных облаках, образующихся при химических авариях, концентрация аммиака может значительно превышать его ПДК ($2 \cdot 10^{-2}$ г/м³).

Пусть распыление растворов соляной, ортофосфорной или винной кислот в аммиачно-воздушном облаке привело к снижению концентрации газообразного аммиака от значения, превышавшего ПДК аммиака в 12,5 раз, до уровня ПДК аммиака за счет его нейтрализации кислотой согласно уравнению (1) при $n = 1$ с образованием соответствующих солей аммония. По данным табл. 2 находим, что концентрации этих солей в аэрозолях превышают их ПДК не менее чем в 72 раза. Для нейтрализации аммиака серной кислотой при $n = 2$ аналогичный расчет предсказывает превышение ПДК соли (сульфата аммония) в аэрозоле в 90 раз. Образующийся при $n = 1$ гидросульфат аммония должен быть не менее вредным для человека веществом, чем сульфат аммония, а значение C_C при $n = 1$ превышает соответствующее значение C_C при $n = 2$.

Таким образом, распыление растворов соляной, серной, ортофосфорной или винной кислот в концентрациях, необходимых для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака, может привести к превышению ПДК вредных веществ (солей аммония) в аэрозолях и в тех случаях, когда распыленные кислоты полностью нейтрализуются аммиаком. Последний вывод, вероятно, верен и для кислот, для которых в табл. 2 приведены ПДК солей натрия: для серной, ортофосфорной, винной кислот ПДК солей натрия и аммония одинаковы, а для соляной кислоты ПДК соли натрия только в 2 раза ниже, чем ПДК соли аммония.

Таблица 2

Концентрации в воздухе солей аммония C_c , образующихся при снижении концентрации газообразного аммиака на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ за счет его нейтрализации распыленными кислотами согласно уравнению (1)

Кислота	ПДК соли $C_c^{\text{ПДК}} \cdot 10^2$, г/м ³	Класс опасности соли	n в уравнении (1)	$C_c \cdot 10^2$, г/м ³	$\frac{C_c}{C_c^{\text{ПДК}}}$
Соляная	1	3	1	6,3	6,3
Серная	1	3	2	7,8	7,8
Уксусная	1*	4*	1	9,1	9,1
Азотная	1**	4	1	9,4	9,4
Ортофосфорная	1	4	1	14	14
	1	4	3	5,8	5,8
Винная	1	3	1	20	20
	1	3	2	11	11
Оксиэтилиден-дифосфоновая	0,5*	3*	3	10	20
Лимонная	0,5*	3*	1	25	50
	0,5*	3*	2	13	26
Щавелевая	0,03***	Нет данных	2	7,3	243

* Для соли натрия.

** Для соли аммония и калия.

*** Вместо ПДК использован ориентировочный безопасный уровень воздействия щавелевокислого аммония в атмосферном воздухе населенных мест, превышающий такой уровень щавелевой кислоты в 2 раза.

Учитывая вышеизложенное, при использовании водных растворов кислот, когда ставят жидкостные завесы с целью обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака, необходимо исключить возможность поражения людей не только аммиаком, но также этими кислотами и продуктами их взаимодействия с аммиаком – солями аммония.

Выводы

В аэрозолях рассмотренных кислот, способных снизить концентрацию газообразного аммиака на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³ за счет его нейтрализации этими кислотами, концентрации указанных кислот превышают их ПДК. Если распыленная в аммиачно-воздушном облаке кислота (соляная, серная, ортофосфорная, винная) израсходуется на нейтрализацию аммиака, снизив его концентрацию на $2 \cdot 10^{-2}$ г/м³, то концентрация образовавшейся при этом соли аммония в аэрозоле превысит ее ПДК.

Таким образом, распыление растворов кислот, предложенных ранее в литературных источниках для нейтрализации газообразного аммиака, в концентрациях, необходимых для обеззараживания аммиачно-воздушных облаков при химических авариях с проливом или выбросом аммиака, может привести к превышению ПДК вредных веществ (кислот или солей аммония) в образующихся аэрозолях.

Список литературы / References

1. Жильцов, А.Н. Существующие и возможные способы и средства ликвидации аварийных выбросов аммиака в местах хранения / А.Н. Жильцов // Современное состояние и перспективы дальнейшего развития системы гражданской обороны Донецкой Народной Республики: материалы 1-й Республ. науч. конф. – Донецк : Академия гражданской защиты МЧС ДНР, 2017. – С. 528 – 530 [Электронный ресурс]. URL: <http://agz.dnmchs.ru/static/upload/agz/AKADEMY/Республиканская%20конференция20по%20ГО/Сборник%20материалов%20конференции.pdf> (дата обращения: 25.10.2019).

Zhil'tsov, A.N. *Sushchestvuyushchiye i vozmozhnyye sposoby i sredstva likvidatsii avariynykh vybrosov ammiaka v mestakh khraneniya* [Existing and possible methods and means of elimination of ammonia releases in the storing places]. *Sovremennoye sostoyaniye i perspektivy dal'neyshego razvitiya sistemy grazhdanskoy oborony Donetskoy Narodnoy Respubliki: materialy 1-y Respublikanskoy nauch. konf.* [Modern state and prospects of further development of the civil defence system of the Donetsk People's Republic: materials of the 1st Republican scientific conference]. Donetsk, The Civil Defence Academy of EMERCOM of DPR Press, 2017, pp. 528 – 530. [Elektronnyy resurs] (Electronic resource). Available at: <http://agz.dnmchs.ru/static/upload/agz/AKADEMY/Республиканская%20конференция20по%20ГО/Сборник%20материалов%20конференции.pdf> (accessed: 25.10.2019).

2. Маланьев, А.В. Поиск средств и разработка методов защиты животных от отравлений парами аммиака : дис. ... канд. биол. наук : 06.02.03 / Андрей Валериянович Маланьев. – Казань, 2010. – 144 с.

Malan'yev, A.V. *Poisk sredstv i razrabotka metodov zashchity zhivotnykh ot otravleniy parami ammiaka: dis. ... kand. biol. nauk: 06.02.03: zashchishchena 14.09.2010.* [Search for means and development of the protection of animals from ammonia vapors poisoning: cand. bio. sci. diss.: 06.02.03]. Kazan, 2010, 144 p.

3. Amelina, L.V. Reducing ammonia concentrations in atmosphere after its unplanned release / L.V. Amelina, M.M. Biliaiev, P.B. Mashykhina // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – 2017. – № 4 (70). – С. 16 – 22.

Amelina, L.V., Biliaiev, M.M., Mashykhina, P.B. Reducing ammonia concentrations in atmosphere after its unplanned release. *Nauka ta prohres transportu. Visnyk Dnipropetrovs'koho national'noho universytetu zaliznychnoho transportu imeni akademika V. Lazariana – Science and Transport Progress. Bulletin of the Dnipropetrovs'k National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 2017, no. 4(70), pp. 16 – 22.

4. Батырев, В.В. Справочник специалиста-химика МЧС России / В.В. Батырев. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2013. – С. 39.

Batyrev, V.V. *Spravochnik spetsialista-khimika MChS Rossii* [Reference book of a chemical expert of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters]. Moscow, FGBU VNII GOChS (FTs) Publ., 2013, p. 39.

5. Попов, В.Г. Удельный расход жидкостей для обеззараживания облаков аварийно химически опасных веществ / В.Г. Попов // Научный вестник НИИГД «Респиратор». – 2019. – № 4 (56). – С. 95 – 104.

Popov, V.G. *Udel'nyy rashkod zhidkostey dlya obezzarazhivaniya oblakov avariyno khimicheskii opasnykh veshchestv* [Specific discharge of liquids for decontamination of clouds of chemically hazardous substances conducive to accidents]. *Nauchnyy vestnik NIIGD "Respirator"* [Scientific bulletin of the NIIGD "Respirator"]. 2019, no. 4(57), pp. 95 – 104.

6. Дорфман, Н.Н. Разработка мероприятий по ликвидации последствий возможной химической аварии на перерабатывающем предприятии / Н.Н. Дорфман, А.Н. Перегудов, С.А. Бокадаров // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России. – 2017. – № 1 (22). – С. 7 – 16.

Dorfman, N.N., Peregudov, A.N., Bokadarov, S.A. *Razrabotka meropriyatiy po likvidatsii posledstviy vozmozhnoy khimicheskoy avarii na pererabatyvayushchem predpriyatii* [Development of measures on elimination of consequences of a potential chemical accident at a processing enterprise]. *Vestnik Voronezhskogo instituta GPS MChS Rossii* [Bulletin of Voronezh institute of State Firefighting Service of EMERCOM of Russia]. 2017, no. 1(22), pp. 7 – 16.

Vitaly Georgiyevich Popov, Cand. Sci. (Chem.), scientific associate;

e-mail: v.g.popov.donetsk@gmail.com

The “Respirator” State Scientific Research Institute of Mine-rescue Work,

Fire Safety and Civil Protection of the MChS DPR

283048, Donetsk, 157, ulitsa Artyoma. Phone: (+38 062) 332-78-43

HARMFUL SUBSTANCES IN AEROSOLS OF ACID SOLUTIONS FOR NEUTRALIZATION OF AMMONIA GAS

Purpose. Study of a possibility to exceed the maximum permissible concentrations of the harmful substances in the aerosols of the acid aqueous solutions being sprayed for decontamination of the air and ammonia clouds during chemical accidents with the spill or release of ammonia.

Methodology. Analytical investigations and mathematical treatment of data from literature sources.

Results. With the help of the chemical equations the minimum concentrations of the acids sprayed in the air have been calculated. They are necessary for reducing the ammonia gas concentration by $2 \cdot 10^{-2} \text{ g/m}^3$ as a result of its neutralization with these acids. Also the concentrations of ammonium salts forming in the air during reducing the ammonia gas concentration by $2 \cdot 10^{-2} \text{ g/m}^3$ as a result of its neutralization with sprayed acids have been calculated.

It has been found that spraying the acid solutions (as suggested earlier for the ammonia gas neutralization by the literature sources) in the concentrations that are necessary for the decontamination of the air and ammonia clouds during the chemical accidents with the ammonia spill or release may result in exceeding the maximum permissible concentrations of the harmful substances (acids and nascent ammonium salts) in the aerosols.

Scientific novelty. The calculations by the chemical equations have been used for the first time to determine the possible concentrations of the harmful substances in the acid solutions aerosols sprayed for the decontamination of the air and ammonia clouds during the chemical accidents.

Practical value. The results of the work contribute to the prevention of human injuries caused by the harmful substances in the aerosols of the acid aqueous solutions used for the decontamination of the air and ammonia clouds during the chemical accidents.

Keywords: *air and ammonia clouds; decontamination; liquid screens; aerosols; acids; ammonium salts; exceeding the maximum permissible concentrations.*

Требования к оформлению статьи

К рассмотрению принимаются статьи, сопровождаемые электронной версией (Microsoft Word 2007, 2010).

Текст рукописи статьи необходимо разместить на странице с полями 2,0 см, первые строки всех абзацев – с отступлением 1,25 см, шрифт Times New Roman, кегль 14, интервал 1,5. Название статьи, заголовки элементов основного текста выделяются полужирным шрифтом.

Структура статьи:

- индекс УДК (в верхнем левом углу страницы);
- полностью имена, отчества и фамилии всех авторов (не более 4 человек), научная степень, место работы (полное название организации), должность, город, номера телефонов и электронная почта, название статьи (до 10 слов) на русском и английском языках;

- реферат (от 200 до 300 слов исключительно общепринятой терминологии) должен быть структурированным и содержать следующие элементы: цель; методика; результаты; научная новизна; практическая значимость; ключевые слова (5–15 слов) на русском и английском языках, реферат не должен повторять названия статьи;

- основной текст статьи;
- список литературы;
- кем рекомендована статья к публикации;
- раздел журнала для размещения статьи.

Основной текст статьи должен содержать следующие необходимые элементы:

- постановка проблемы;
- анализ последних исследований и публикаций;
- выделение не решенных ранее частей общей проблемы;
- формулировка цели статьи;
- описание методики (структуры, последовательности) проведения исследования;
- изложение основного материала и полученных научных результатов;
- выводы и перспективы дальнейшего развития в этом направлении.

Объем статьи, включая текст, таблицы, рисунки, должен быть от 7 до 9 страниц. Рекомендуется, чтобы площадь, занятая рисунками, составляла не более 25 % общего объема. Материал должен быть изложен сжато, без повторений данных таблиц и рисунков в тексте.

Рисунки (диаграммы, фото и др.) располагаются вместе с текстом в местах ссылок на них. Подписи к рисункам должны содержать нумерацию в порядке размещения в тексте и объяснительную подпись. Недопустимо включать подписи в сам рисунок.

Формулы в статьях должны быть набраны с помощью редактора формул (внутренний редактор формул в редакторе Microsoft Word for Windows или Microsoft Equation), стиль – математический (курсив). Формулы отделяют от текста сверху и снизу одним интервалом. Нумерация формул, на которые есть ссылка в тексте, – справа в скобках. Все физические величины приводятся в системе СИ.

Таблицы – в книжной ориентации, они должны иметь тематические заглавия и номера, фон таблицы другим цветом не выделяют. Желательная длина таблицы – не больше одной страницы.

Список литературы (не более 15 источников с датой их издания не ранее чем за 10 лет и количеством самоссылок до 20 %) приводится в порядке упоминания в тексте.

Статья должна быть тщательно проверена, печатный вариант – подписан всеми авторами и сопровождаться письменной рекомендацией доктора наук соответствующего профиля.

Ответственность за содержание статьи несет автор. Предоставленные материалы не возвращаются.

Статьи, которые не отвечают требованиям редакции, не рассматриваются.

Научный вестник НИИГД «Респиратор»

Научно-технический журнал
2020, № 1(57)

На русском и английском языках

Редактор Э.Я. Бранопольская

Переводчик Л.А. Ахундова

Верстальщик Н.Н. Грибенюк

Учредитель и издатель

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

Поступившие на издание статьи проходят рецензирование

Подписано к использованию 27.02.2020.

Адрес редакции и издателя: НИИГД «Респиратор», ул. Артема, 157, Донецк, 283048

Телефоны: (+ 38 062) 332-78-01; 332-78-64

Объем 4,90 Мб

E-mail: respirator@mail.dnmchs.ru

URL: <http://respirator.dnmchs.ru>

Дата размещения на сайте 3 марта 2020 г.