

# **ВЕСТНИК**

**Научного центра по безопасности работ  
в угольной промышленности**

**Научно-технический журнал**



**Кемерово**

**1-2018**

**ВЕСТНИК  
Научного центра  
по безопасности работ  
в угольной промышленности**

**ISSN 2072-6554**

**DOI 10.26631/issn.2072-6554**

**№ 1-2018**

**Выходит 4 раза в год**

Подписной индекс  
в Каталоге Агентства  
«Роспечать» 2018 г. – 35939

**ЖУРНАЛ ЗАРЕГИСТРИРОВАН**

Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-71529 от 13.11.2017 г.

**ЖУРНАЛ ВКЛЮЧЕН**

в «Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук», сформированный ВАК при Минобрнауки России

**Учредитель и издатель**

**научно-технического журнала «Вестник...»:**

**Общество с ограниченной**

**ответственностью «ВостЭКО»**

**(ООО «ВостЭКО»)**

Адрес издателя и редакции:

650002, Россия, Кемеровская область,

г. Кемерово, Сосновый бульвар, 1

Редакторы: *М. В. Ярош, Л. С. Кузавкова,  
Д. А. Трубицына*

Компьютерная верстка *Д. А. Трубицына*

тел. 77-86-62, 64-26-51.

e-mail: yarosh\_mv@mail.ru

dtrubitsyna@gmail.com

www.ind-saf.ru

Позиция редакции не всегда совпадает  
с точкой зрения авторов публикуемых материалов

В номере использованы материалы сайтов  
www.lori.ru, www.freemages.com, www.unsplash.com и  
www.graphicriver.net

**16+**

© ООО «ВостЭКО», 2018

Адрес типографии:  
650065, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, пр-т  
Октябрьский, 28 офис 215  
тел. 8 (3842) 657889. ООО «ИНТ».

**Главный редактор: Н. В. Трубицына**

**Редакционная коллегия:**

**Н. В. Трубицына** – главный редактор, заместитель  
директора по научной работе ООО «ВостЭКО»,  
д-р техн. наук

**А. С. Ярош** – заместитель главного редактора,  
генеральный директор АО «НИИГД», канд. техн.  
наук

**А. А. Васильев** – заведующий лабораторией  
ФГБУН «Институт гидродинамики им. М.А.  
Лаврентьева СО РАН», д-р физ.-мат. наук, проф.

**А. М. Брюханов** – и.о. председателя  
Государственного комитета Гортехнадзора ДНР,  
д-р техн. наук

**Д. В. Исламов** - депутат ГД ФС РФ, кандт. техн.  
наук

**В. И. Клишин** – директор Института угля  
Федерального исследовательского центра угля и  
углехимии СО РАН, чл.-корр. РАН, д-р техн. наук,  
проф.

**З. Р. Исмагилов** - директор Института углехимии  
и химического материаловедения Федерального  
исследовательского центра угля и углехимии СО  
РАН, чл.-корр. РАН, д-р хим. наук, проф.

**А. В. Шадрин** – ведущий научный сотрудник  
Института угля ФИЦ УУХ СО РАН, д-р техн. наук

**В. Г. Казанцев** – заведующий кафедрой «БТИ»  
(филиал) ФГБОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И.  
Ползунова», д-р техн. наук

**В. С. Зыков** – заместитель генерального директора  
НЦ «ВостНИИ», д-р техн. наук, проф.

**Д. А. Трубицына** – выпускающий редактор ООО  
"ВостЭКО"

**М. В. Ярош** – редактор ООО «ВостЭКО»

# INDUSTRIAL SAFETY

---

Scientific-technical magazine

Kemerovo

1 - 2018

**INDUSTRIAL SAFETY**

**ISSN 2072-6554**

**DOI 10.26631/issn.2072-6554**

**№ 1-2018**

**Is issued 4 times a year**

Subscription index  
in «Rospechat» Agency  
Catalogue: Year 2018 – 35939

**MAGAZINE IS REGISTERED**

by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications, Information Technologies and Mass Communications. Registration certificate of mass information means PI № FS77-71529 dated by 13.11.2017 г.

**THE MAGAZINE IS INCLUDED**

into «The list of russian reviewed scientific magazines in which main scientific results of dissertations for scientific degrees of a doctor and a candidate of sciences must be published». The list is formed by Higher Attestation Commission of RF Ministry of Education and Science.

**Promoter and publisher of «Industrial Safety» scientific-technical magazine:**

**Co Ltd «VostEKO»**

Address of the publisher and editors:

650002, Russia, Kemerovskaja oblast, Kemerovo, Sosnovyi bd., 1.

Editors: *M.V. Yarosh, L.S. Kuzavkova, D.A. Trubitsyna*  
Computer layout *D.A. Trubitsyna*

Tel. 77-86-62, 64-26-51.

e-mail: yarosh\_mv@mail.ru  
dtrubitsyna@gmail.com

www.ind-saf.ru  
www.indsafe.ru

---

The edition position not always coincides with the point of view of authors of published materials

---

---

In the issue of the magazine materials of sites  
www.lori.ru, www.freelimages.com, www.unsplash.com  
and www.graphicriver.net are used

---

**16+**

---

© Co Ltd «VostEKO», 2018

---

Address of the printing  
650065, Russia, Kemerovskaja oblast, Kemerovo, prosp.  
Oktyabrsky, 28 of. 215  
tel. 8 (3842) 657889.  
OOO «INT».

**Chief editor: N. V. Trubitsyna**

**Editorial board:**

**N. V. Trubitsyna** – chief editor, deputy director for scientific work of OOO «VostEKO», doctor of technical sciences

**A. S. Yarosh** – deputy chief editor, CEO of PC “Scientific Research Mine Rescue Institute”, candidate of technical sciences

**A. A. Vasil'ev** - Head of the Laboratory FGBUN "M.A. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB of RAS, doctor of physical and mathematical sciences, professor

**A. M. Brjuhanov** - Acting Chairman of the State Committee Gortehnadzora DNR, doctor of technical sciences

**D. V. Islamov** - deputy of the State Duma of the Federal Assembly of the Russian Federation, candidate of technical sciences

**V. I. Klishin** - director of the Institute of coal, Federal research center of coal and coal chemistry SB RAS, corresponding member of RAS, doctor of technical sciences, professor

**Z. R. Ismagilov** - director of the Institute of coal chemistry and materials chemistry, Federal research center of coal and coal chemistry SB RAS, corresponding member of RAS, doctor of chemical sciences, Professor

**A. V. Shadrin** – Leading researcher of the Institute of Coal FIC UUH SB RAS, doctor of technical sciences

**V. G. Kazantsev** – chairman of «BTI» (branch) FGBOU VPO «AltGTU after I.I.Polzunov», doctor of technical sciences

**V. S. Zykov** – deputy general director JSC «ScC VostNII», doctor of technical sciences, professor

**D. A. Trubitsyna** – OOO «VostEKO» Commissioning Editor

**M. V. Yarosh** – OOO «VostEKO» editor

## Уважаемые авторы, партнёры и читатели!

*Первый в этом году номер научно-технического журнала "Вестник" вышел по времени из печати согласно срокам и издательским планам редакционной коллегии. Это значит, что 2018 год, продолжит лучшие традиции журнала, сложившиеся в прежние годы.*

*Как и раньше, редакционный коллектив настроен оправдывать ожидания аудитории своих читателей, которая заметно приросла в последние годы вместе с кругом авторов и друзей издания. Наша команда продолжит над этим работать.*

*В арсенале у нас есть эффективные инструменты для дальнейшего укрепления авторитета «Вестника» в профессиональной среде. Ставку мы делаем прежде всего на актуальность публикаций по всему тематическому спектру, отражающему различные направления развития теории и практики промышленной безопасности на угледобывающих предприятиях. Мы решительно настроены также на дальнейшее продвижение журнала в цифровом пространстве. Это ключевое требование ко всем современным изданиям для нас было и остаётся в приоритете.*

*Редакционный портфель журнала позволяет редколлегии со всей ответственностью заявить читателям «Вестника», что в информационном плане нынешний год обещает быть хорошим. Подтверждение тому – тематическая структура первого номера. Публикации как отдельных авторов, так и авторских коллективов привлекут к себе внимание новизной научных взглядов и своим основательным подходом к серьезным и актуальным для всех нас проблемам и вопросам.*

*Наряду с этим подчеркиваем: все они по сути своей инновационные, что отвечает научным и производственным ожиданиям и интересам, государственным и социальным требованиям, а также тенденциям, явно обозначившимся в отраслевой экономике в последние годы. Это именно те факторы, которые вместе с мерами государственной политики и серьезными инвестициями оказывают ключевое влияние на снижение аварийности и травматизма на предприятиях различных отраслей промышленности.*

*В порядке анонса коснемся только некоторых важных тем и проблем, поднимаемых в материалах этого номера журнала. Это, к примеру, эффективность принимаемых на шахтах инженерных решений по предотвращению опасных газовых ситуаций и обеспечения безопасных условий ведения горных работ. Авторы предлагают новый подход для рационального выбора способов управления газовой выделением.*

*Объемно представлен на этот раз раздел пожарной и промышленной безопасности. В одной публикации рассматриваются механизмы ускорения пламени и перехода горения в детонацию в условиях угольной шахты. В другой авторы моделируют процесс нестационарного горения метано-воздушной смеси, анализируют влияние концентрации ингибирующих до-*

бавок на химическую стойкость эмульсионных взрывчатых веществ в среде пирита.

Сразу в нескольких публикациях «Вестника» исследуется и анализируется ситуация с профессиональными заболеваниями и скрытыми рисками гибели людей. В одном из материалов рассмотрен вопрос о влиянии единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на риск гибели людей при пожарах.

Авторы этого номера журнала продолжают эффективное погружение в технологические вопросы безопасности горных работ.

Достойно в этом «Вестнике» представлена дискуссионная рубрика «Проблемы и суждения». Здесь излагается неординарный взгляд авторов на современные тенденции по обеспечению безопасности производственного персонала на предприятиях. Ещё в одном материале в центре внимания горный массив. Он рассматривается как аккумулятор энергии землетрясений, горных ударов и внезапных выбросов. Задавшись изучением проблемы, автор рассуждает о том, миф это или реальность...

И напоследок о наших авторах. Это, как всегда, известные учёные, яркие представители школ и направлений в отраслевой науке, их ученики и последователи. Они представляют достижения научных коллективов Кузбасса, Алтайского края и, пусть никого не удивляет, столицу отечественного текстиля Иваново. Впрочем, география тех, кто определяет лицо этого номера «Вестника», не только выпадает из привычных представлений, но и подчёркивает роль современных коммуникаций. О важном и главном сегодня говорят под одной обложкой учёные России и других стран.

С уважением,  
НЭЛЯ ТРУБИЦЫНА,  
главный редактор, д.т.н.



# ГОРНЫЙ ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ МУЗЕЙ

СКОРО ОТКРЫТИЕ



ГОРНЫЙ  
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ  
**МУЗЕЙ**

ООО «ВОСТЭКО» ПРЕДСТАВЛЯЕТ  
В КУЗБАССКОМ ТЕХНОПАРКЕ

[INDSAFE.RU](http://INDSAFE.RU)

# I. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ГЕОМЕХАНИКА

## I. INDUSTRIAL SAFETY AND GEOMECHANICS



**Е. Н. Козырева //**  
**Ye. N. Kozyreva**  
**gas\_coal@icc.kemsc.ru**

канд. техн. наук, заведующий лабораторией ФГБУН «ФИЦ УУХ СО РАН», Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10  
candidate of technical sciences, laboratory head of Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky Avenue, Kemerovo, 650065, Russia



**А. А. Рябцев // A. A. Riabtsev**  
**gas\_coal@icc.kemsc.ru**

ведущий инженер ФГБУН «ФИЦ УУХ СО РАН», Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10  
leading engineer of Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky Avenue, Kemerovo, 650065, Russia

УДК 622.02+622.24

### ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА И НЕОБХОДИМОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЕГО ДЕГАЗАЦИИ

#### A COAL SEAM GAS DYNAMIC ACTIVITY AND ITS DEGASING APPLICATION NECESSITY

*Горно-геологические условия залегания угольного пласта и способы его отработки определяют выбор рационального способа управления газовыделением на выемочном участке. Эффективность принимаемых на шахте инженерных решений по предотвращению опасных газовых ситуаций и обеспечения безопасных условий ведения горных работ зависит от точности оценки природных свойств угольного пласта. Авторами статьи предлагается новый подход для рационального выбора способов управления газовыделением. В основе подхода для повышения плотности исходной горно-геологической информации лежат данные геологоразведочных скважин о пластопересечениях и полученные закономерности о реализации газовой составляющей угольного пласта. В качестве комплексного показателя для оценки природных свойств пласта принят показатель его газодинамической активности с учетом реализации энергии газа, содержащегося в угле. Численные значения этого показателя позволяют зонировать пласт по уровням опасности газодинамических явлений (от газовой до газодинамической), а также рассчитывать требуемый коэффициент дегазации обрабатываемого пласта для предотвращения опасного уровня реализации энергии газа. Показано, что с учетом структуризации массива горных пород в конкретных горно-геологических и горно-технологических условиях возможно заблаговременно и более точно определять параметры скважин дегазации пластов-спутников.*

*Mining and geological conditions of a coal seam occurrence and methods of its development determine the choice of a rational method for gas emission control at an extraction site. The engineering decisions' effectiveness taken at the mine to prevent dangerous gas situations and to ensure safe mining conditions depends on the coal seam natural properties assessment accuracy. The authors of the article propose a new approach for gas emission control methods rational choice. The approach on increasing the density of the initial mining and geological information is based on the data of geological exploration holes on the seams interpenetration and the obtained regularities on the coal seam gas component realization. As a complex indicator for assessing the natural properties of the seam, the indicator of its gas dynamic activity is taken into account with consideration of the gas contained in coal energy realization. Numerical values of this indicator allow to zonate the seam according to the levels of gasdynamic phenomena (from gas to gasdynamic), and also to calculate the required degassing factor of the developed seam to prevent dangerous level of gas energy realization. It is shown that taking into account the structuring of the rock massif in specific mining-geological and mining-technological conditions, it is possible to determine in advance and more accurately the parameters of the degassing holes of the satellite seams.*



**Ключевые слова:** УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ГАЗОНОСНОСТЬ, ЭНЕРГИЯ ГАЗА, ГАЗОДИНАМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ, ДЕГАЗАЦИЯ, ВЫЕМОЧНЫЙ УЧАСТОК, УПРАВЛЕНИЕ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕМ

**Key words:** COAL SEAM, GAS CONTENT, GAS ENERGY, GAS-DYNAMIC ACTIVITY, DEGASSING, EXTRACTION SECTION, GAS EMISSION CONTROL

Повышенная производительность современных очистных забоев требует более точной оценки природной газоносности угольных пластов для прогноза динамики метанообильности выемочных участков, а также для расчета параметров проветривания и дегазации. Но выполнение требования по повышению точности весьма затруднительно из-за малой плотности прямого газового опробования пластов при геологоразведочных работах. В нормативном документе [1], применяемом для прогноза метанообильности проектируемых выемочных участков, оценка их горно-геологических условий выполняется на основе данных одной-двух геологоразведочных скважин.

Для принятия эффективных решений по предотвращению опасных газовых ситуаций в очистных и подготовительных выработках в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН выполняются работы по исследованию свойств углей, динамических явлений, геомеханических особенностей массива горных пород и по решению технологических задач при подземной угледобыче [2–7].

Новизна исследований, проводимых авторами статьи, заключается в следующем. Во-первых, еще до начала ведения горных работ оценка горно-геологических данных выполняется по всем геологоразведочным скважинам в пределах рассматриваемого шахтоучастка с применением методов пространственного моделирования. Это позволяет учесть объемную изменчивость газокинетических свойств массива, в том числе в пределах выемочных столбов [8, 9]. Во-вторых, в процессе ведения горных работ выполняется отбор угольных образцов из скважин, пробуренных из подземных горных выработок для уточнения природной газоносности угольных пластов [10].

Для повышения плотности горно-геологической информации и выбора (до начала ведения горных работ) способов управления газовой выделением предлагается следующий подход.

1. По геолого-маркшейдерской документации шахты сформировать базу геологоразведочных данных в виде электронных таблиц, содержащих информацию об отметках устьев скважин в пределах выемочного поля, стратиграфии залежи, природных значениях газоносности, зольности, влажности, выхода летучих веществ

угольных пластов.

2. По базе геологоразведочных данных установить зависимости изменения природной газоносности угольных пластов от глубины их залегания.

3. На основании установленных зависимостей рассчитать природную газоносность пластов и с учетом планов развития горных работ выполнить интерполяцию её значений в пределах рассматриваемого выемочного поля и планируемых к обработке выемочных участков.

4. Рассчитать газодинамическую активность обрабатываемого пласта и выполнить пространственное моделирование уровней его газодинамической активности.

5. По фактору газодинамической активности уточнить необходимость проведения дегазации угольного пласта в пределах рассматриваемого выемочного поля.

Для конкретных горно-геологических и горно-технологических условий (в процессе ведения горных работ) изложенный подход дополняется этапом прямого измерения газоносности пласта по пробам угля, отобранных из горных выработок, и расчетом параметров дегазации обрабатываемого пласта с учетом влияния горных работ [10]. Расчет параметров дегазации сближенных пластов на выемочном участке выполняется с применением параметрической модели геомеханической структуризации вмещающего массива с учетом реализации его упругой энергии при подвигании очистных забоев [11].

Рассмотрим реализацию изложенного метода на примере пласта 5 Чертинского месторождения. По геолого-маркшейдерской документации и данным 128-ми геологоразведочных скважин сформирована база геологоразведочных данных в виде электронных таблиц. По этим данным установлены стратиграфические особенности условий залегания угольных пластов и их свойства. По установленным зависимостям рассчитаны значения природной газоносности рабочих пластов, выполнено их пространственное моделирование и по координатам устьев геологоразведочных скважин построены соответствующие карты.

На рисунке 1 представлена карта природной газоносности пласта 5, отражающая ее значительную изменчивость на рассматриваемом шахтоучастке, площадью 49 км<sup>2</sup>. В средней

части шахтоучастка на максимальной глубине по оси Чертинской брахисинклинали природная газоносность пласта достигает значений  $30 \text{ м}^3/\text{м с.б.м.}$  Полученная пространственная информация позволяет выполнять оценку газокинетических и газодинамических свойств пласта.

Однако при прогнозе метанообильности выемочного участка одной из трудностей является нелинейная зависимость скорости газовой выделенности из отбиваемого угля от природной газоносности пласта. В основе этих затруднений лежит эффект саморазрушения угля при разгрузке от горного давления за счет энергии содержащегося в нем газа. Такая потенциальная способность пласта к саморазрушению определяется как газодинамическая активность. К настоящему времени созданы основы метода количественного определения газодинамической активности пластов, обеспечивающие единство подхода к анализу динамики реализации энергии содержащегося в угле газа (метанообильность, выбросы) от природных свойств пласта [12].

В своей работе [13] авторы отмечают, что угольные пласты необходимо рассматривать как двухкомпонентный геоматериал, основными составляющими которого являются твердая и газовая компоненты. Ранее результаты исследований позволили установить [12, 14], что энергию газа, реализующуюся в процессе распада углеметанового пласта на уголь и метан, характеризует показатель газодинамической активности  $E$ , который определяется по формуле

$$E = 0,25 \frac{X}{B}, \text{ МДж/т,}$$

где  $X$  – природная газоносность пласта,  $\text{м}^3/\text{м}$ ;  $B$  – константа метаноносности, зависящая от выхода летучих веществ,  $1/\text{МПа}$ .

На рисунке 2 представлена карта показателя газодинамической активности, рассчитанная для условий пласта 5. Видим, что средняя часть шахтопласта, наряду с наибольшими значениями природной газоносности, имеет максимальные значения показателя  $E$ .

Энергетический показатель  $E$  интегрирует совокупное влияние газоносности, глубины залегания пласта и выхода летучих веществ и позволяет выделить границы перехода от газовой опасности к газодинамической. Установлено [12], что значения энергетического показателя от 40 до 100  $\text{МДж/т}$  на особо выбросоопасных пластах при пересечении зон геологических нарушений соответствуют условиям возникновения слабых газодинамических явлений (выдавливания, обрушения с повышенным притоком метана в выработку). При  $E \geq 100 \text{ МДж/т}$  возможны

уже собственно внезапные выбросы угля и газа значительной силы. Это позволяет создать основу для зонирования углеметановых пластов по уровню их газодинамической активности и расчета требуемого коэффициента дегазации пласта, то есть до значений  $E$ , не превышающих 100  $\text{МДж/т}$ .

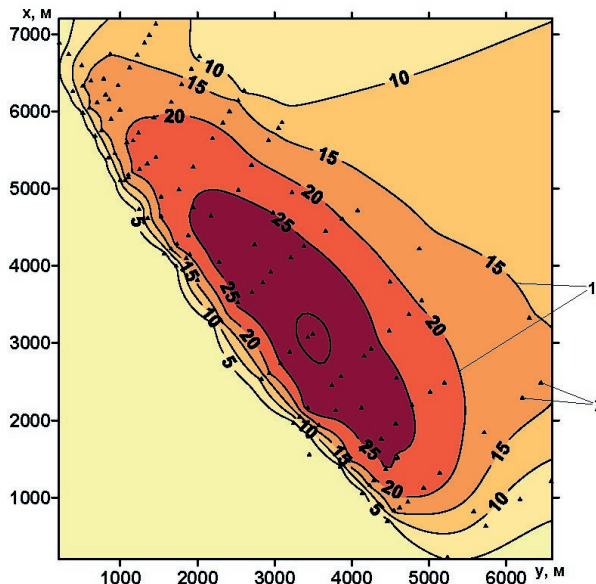


Рисунок 1 – Карта природной газоносности пласта 5.  $x$  – направление на север, м;  $y$  – направление на восток, м; 1 – изогаза пласта,  $\text{м}^3/\text{м с.б.м.}$ ; 2 – устье скважины.  
Figure 1 – Natural seam 5 gas content map.  $x$  – North direction, m;  $y$  – East direction, m; 1 – seam iso-gas,  $\text{m}^3/\text{t s.b.m.}$ ; 2 – borehole mouth.

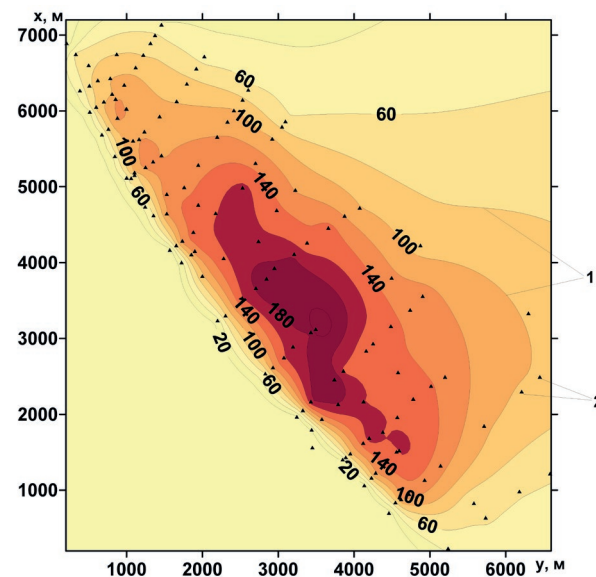


Рисунок 2 – Карта показателя газодинамической активности пласта 5.  $x$  – направление на север, м;  $y$  – направление на восток, м; 1 – изолиния показателя газодинамической активности пласта,  $\text{МДж/т}$ ; 2 – устье скважины  
Figure 2 – Seam 5 gas-dynamic activity index map.  $x$  – North direction, m;  $y$  – East direction, m; 1 – seam gas-dynamic activity index isoline,  $\text{mdg/t}$ ; 2 – borehole mouth

Карта показателя газодинамической активности (рисунок 2) служит основанием для количественной оценки требуемой эффективности дегазации (рисунок 3).

Следует заметить, что получаемые этим методом коэффициенты дегазации ориентированы только на предотвращение саморазрушения пласта за счет энергии содержащегося в нем газа. Такая степень дегазации предотвращает спонтанный, неадекватный увеличению газоносности рост начальной скорости газовыделения из отбиваемого угля. Необходимость применения более глубокой дегазации пластов для снижения метанообильности горных работ должна определяться соответствующими методами рудничной аэрогазодинамики.

Примером расчетов параметров дегазации для выемочного участка в конкретных горно-геологических и горно-технологических условиях может служить определение параметров скважин дегазации с учетом структуризации вмещающего массива [15] для лавы № 560 шахты «Чертинская-Коксовая». Ранее в работе [16] были представлены результаты расчетов по определению количества скважин для дегазации подрабатываемых и надрабатываемых пластов и мест их заложения, выполненных на основе особенностей нелинейной структуризации массива при движении забоя. Было показано, что места бурения скважин должны быть ориентиро-

ваны в максимумы зон разгрузки дегазируемых пластов (на расстояниях ас.п.4, ас.п.6, как представлено на рисунке 4).

Основной результат был получен при сравнении параметров скважин, рассчитанных по методу Института угля ФИЦ УУХ СО РАН с уче-

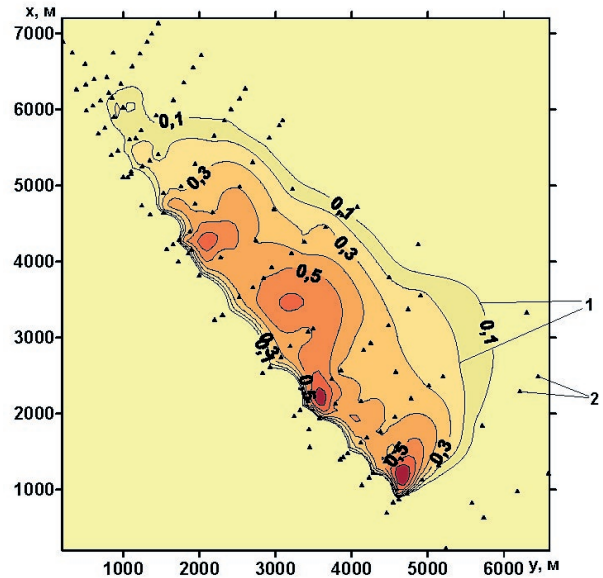


Рисунок 3 – Карта коэффициента дегазации пласта 5  
 x – направление на север, м; y – направление на восток, м;  
 1 – изолиния коэффициента дегазации пласта;  
 2 – устье скважины  
 Figure 3 – seam 5 degassing coefficient map  
 x – North direction, m; y – East direction, m;  
 1 – seam degassing coefficient isoline; 2 – borehole mouth

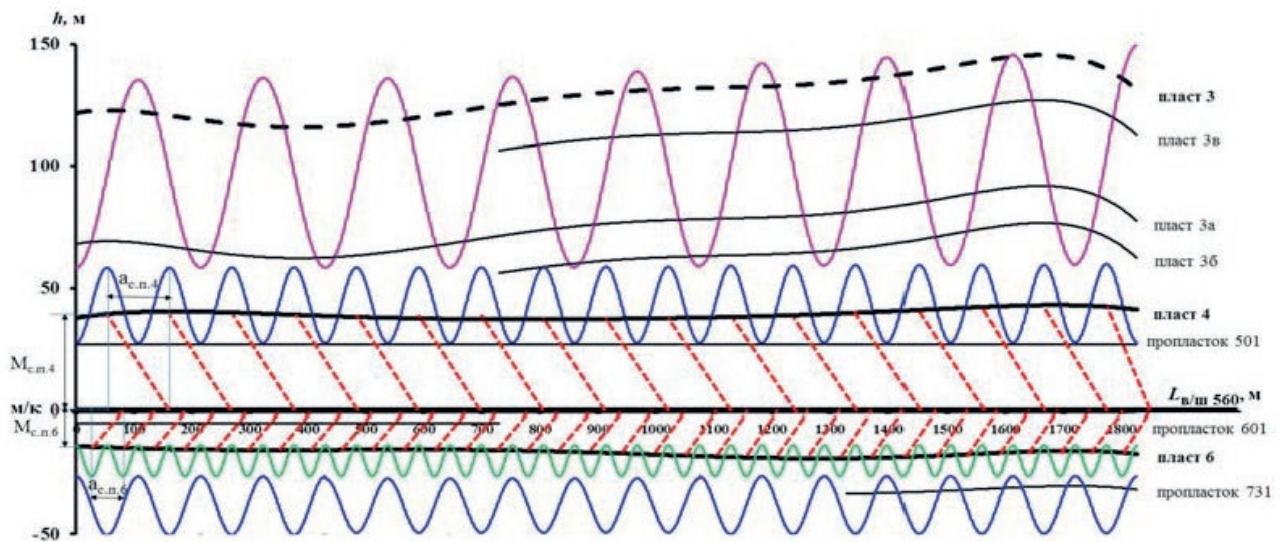


Рисунок 4 – Вертикальная схема бурения кустов дегазационных скважин по длине вентиляционного штрека 560  
 - - - - - дегазационные скважины; ас.п.4, ас.п.6 – вертикальные проекции скважин, буримых на подрабатываемый пласт 4 и надрабатываемый пласт 6, соответственно;  
 Мс.п.4, Мс.п.6 – расстояние по нормали между разрабатываемым и сближенным пластами 4 и 6, соответственно  
 Figure 4 – Degassing borehole cluster drilling along ventilation gallery 560 vertical scheme  
 - - - - - Degassing boreholes; a sl.4, a sp.6 – boreholes drilled to upper seam 4 and underlying seam 6, respectively vertical projections; M sl.4, M sp.6 - distance along the normal between the developed and adjacent seams 4 and 6, respectively

том уточненных стратиграфических и установленных геомеханических особенностей массива горных пород, и параметров скважин, рассчитанных по нормативному документу [17]. Установлены принципиальные отличия при определении величины проекции оси скважин на горизонтальную ось выработки и проекции кустов скважин, буримых на дегазируемый пласт. Согласно нормативному документу [17] эта величина принимается постоянной. А по предложенному методу она рассчитывается в зависимости от длины очистного забоя и количества максимумов в зонах разгрузки, что уменьшило количество скважин и изменило места их заложения как вкрест простирания пласта, так и по длине выработки. Определяемое таким способом количество скважин является минимально необходимым количеством кустов скважин для рассматриваемых условий. При этом достигается главная цель дегазации сближенных пластов – максимально возможное снижение метанообильности выработанного пространства действующего выемочного участка, то есть достижение требуемого коэффициента дегазации.

Полученные результаты указывают на возможность не только качественной оценки уровня газодинамической активности пластов и их зон, но и количественное уточнение этих показателей и их границ. Структура и величина показателя газодинамической активности позволяют выполнять зонирование углеметановых пластов по уровням опасности, а установление значений показателя, при которых газодинамическая активность достигает уровня выбороопасности, обеспечивает выделение границы качественного изменения вида опасности (от газовой до газодинамической). Результаты по применению параметрической модели геомеханической структуризации вмещающего массива с учетом реализации его упругой энергии при подвигании очистных забоев в конкретных горно-геологических условиях позволяют принимать эффективные технологические решения по предотвращению опасных газовых ситуаций на выемочном участке при определении параметров скважин дегазации пластов-спутников, определении количества скважин и мест их заложения.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по применению схем проветривания выемочных участков шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Серия 05. Выпуск 21. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2017. 128 с.
2. Кормин А.Н., Застрелов Д.Н., Тайлаков В.О. Определение газоносности угольных пластов в процессе ведения горных работ // Отдельный выпуск горного информационно-аналитического бюллетеня. 2013. ОВ 6. С. 155–159.
3. Клишин В.И., Опрк Г.Ю. Расчёт газовыделения в очистной забой в системах разработки подэтажными штреками «крепь-штрек» // Вестник кузбасского государственного технического университета. 2012. № 6. С. 54–59.
4. Клишин В.И. Комплексные технологические решения по обеспечению безопасной подземной угледобыче // Фундаментальные и прикладные вопросы горных наук. 2014. № 1. С. 5–12.
5. Черданцев Н.В., Черданцев С.В. Разработка и реализация математической модели геомеханического состояния горного массива, вмещающего угольный пласт и пройденную по нему выработку // Вычислительные технологии. 2017. № 1. С. 84–96.
6. Тайлаков О.В., А. Смыслов И., Уткаев Е.А.. Оценка фильтрационных свойств угольных пластов // Газовая промышленность. Спец. выпуск. 2012. № 672. С. 24–25.
7. Шадрин А.В. Геофизический критерий предвыбросного развития трещин в угольном пласте // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2016. № 4. С. 48–62.
8. Рябцев А.А. Подготовка данных о газоносности пластов для электронного картирования // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2011. № 2. С. 120–124.
9. Методические основы автоматизированной оценки распределения газового потенциала вмещающего массива / Е.Н. Козырева [и др.] // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 3. С. 20–26.
10. Рябцев А.А., Непейна Е.С., Альков В.И. Измерение газоносности угольного пласта из горных выработок // Уголь. 2016. № 1. С. 68–70.
11. Полевщиков Г.Я., Козырева Е.Н., Шинкевич М.В., Леонтьева Е.В. Техногенная структуризация массива горных пород при выемке пласта угля // Горный журнал. 2017. № 4. С. 19–23.
12. Полевщиков Г.Я., Киряева Т.А., Рябцев А.А., Плаксин М.С. Оценка газодинамической активности пластов с учетом данных газового опробования // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008. № 3. С. 115–120.
13. Распад твердых углегазовых растворов / А.Д. Алексеев [и др.] // Физико-технические проблемы разработки месторождений полезных ископаемых. 1994. № 3. С. 65–75.
14. Плаксин М.С., Рябцев А.А., Сухоруков В.А. Оценка газодинамической активности углеметановых пластов при ведении горных работ и планирование объемов извлечения попутного метана // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2010. № 1. С. 43–50.
15. Шинкевич М.В., Леонтьева Е.В. Моделирование техногенной структуризации вмещающего массива горных пород при ведении очистных работ // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2015. № 3. С. 23–31.

16. Применение параметрической модели развития иерархии геоструктур в массиве горных пород для проектирования параметров выемочных участков / Е.Н. Козырева [и др.] // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов. 2016. № 2. С. 54–63.
17. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015. 250 с..

## REFERENCES

1. *Instruktsiia po primeneniiu skhem provetrivaniia vyiemochnykh uchastkov shakht s izolirovannym otvodom metana iz vyrabotannogo prostranstva s pomoshchiu gazootsasyvaiushchikh ustanovok [Instructions for the application of ventilation schemes for mine sections with isolated methane drainage from the gob area by means of gas-sucking plants]. Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskij tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti» - Industrial Safety Problems Scientific-Technical Research Center, 2017, [in Russian].*
2. Kormin, A.N., Zastrellov, D.N., & Tailakov, V.O. (2013). Opredelenie gazonosnosti ugolnykh plastov v protsesse vedeniia gornykh rabot [Coal seam gas content assessment in the process of mining works]. *Otdelnyy vypusk gornogo informatsionno-analiticheskogo byulletenia – Mining Informational Analytical Bulletin Special Issue, 6, 155-159 [in Russian].*
3. Klishin, V.I., & Opruk, G.Yu. (2012). Raschiot gazovydeneniia v ochildnoi zabori v sistemakh razrabotki podehtazhnyimi shtrekami «krep-shtrek» [Gas emission into an extraction coal face calculation with “support-gallery” sublevel development systems]. *Vestnik kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Herald of Kuzbass State Technical University, 6, 54-59 [in Russian].*
4. Klishin, V.I. (2014). Kompleksnye tekhnologicheskie resheniya po obespecheniiu bezopasnoi podzemnoi ugledobychi [Complex technological solutions for ensuring safe underground coal mining]. *Fundamentalnyie i prikladnyie voprosy gornykh nauk - Fundamental and applied questions of mining sciences, 1, 5-12 [in Russian].*
5. Cherdantsev, N.V., & Cherdantsev, S.V. (2017). Razrabotka i realizatsiia matematicheskoi modeli geomekhanicheskogo sostoiianiia gornogo massiva, vmeshchaiushchego ugolnyi plast i proidennuiu po nemu vyrabotku [Geomechanical state of a rock massif containing a coal seam and the opening headed in it mathematical model development and implementation]. *Vychislitelnyie tekhnologii - Computing technologies, 1, 84-96 [in Russian].*
6. Tailakov, O.V., Smyslov, A.I., & Utkaev, Ye.A. (2012). Otsenka filtratsionnykh svoystv ugolnykh plastov [Coal seams filtration properties evaluation]. *Gazovaia promyshlennost – Gas Industry, special issue, 672, 24-25 [in Russian].*
7. Shadrin, A.V. (2016). Geofizicheskiy kriteriy predvybrosnogo razvitiia treshchin v ugolnom plaste [Geophysical criterion of close-to-outburst cracks in a coal seam development]. *Fiziko-tekhnicheskiie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh - Physical and technical problems of mining, 4, 48-62 [in Russian].*
8. Riabtsev, A.A. (2011). Podgotovka dannykh o gazonosnosti plastov dlia elektronnoy kartirovaniia [Preparation of data on the seams gas content for electronic mapping]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 2, 120-124 [in Russian].*
9. Kozyreva, Ye.N., Riabtsev, A.A., Granicheva, O.V., Plaksin, M.S., Leontieva, Ye.V., & Rodin, R.I. (2016). Metodicheskiie osnovy avtomatizirovannoi otsenki raspredeleniia gazovogo potentsiala vmeshchaiushchego massiva [Methodical foundations of the bedding massif gas potential distribution automated estimation]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 3, 20-26 [in Russian].*
10. Riabtsev, A.A., Nepeina, Ye.S., & Alkov, V.I. (2016). Izmereniie gazonosnosti ugolnogo plasta iz gornykh vyrabotok [A coal seam gas content measuring from mine openings]. *Ugol – Coal, 1, 68-70 [in Russian].*
11. Polevshchikov, G.Ya., Kozyreva, Ye.N., Shinkevich, M.V., & Leontieva, Ye.V. (2017). Tekhnogennaia strukturizatsiia massiva gornykh porod pri vyiemke plasta uglia [Technogenic structuring of the rock massif with the coal seam extraction]. *Gorny zhurnal – Mining Magazine, 4, 1923 [in Russian].*
12. Polevshchikov, G.Ya., Kiriaeva, T.A., Riabtsev, A.A., & Plaksin, M.S. (2008). Otsenka gazodinamicheskoi aktivnosti plastov s uchedom dannykh gazovogo oprobovaniia [Coal seams gas-dynamic activity estimation with gas testing data consideration]. *Gorny informatsionno-analiticheskii byulleten – Mining Informational Analytical Bulletin, 3, 115-120 [in Russian].*
13. Alekseev, A.D., Airuni, A.T., & Zverev, I.T. (1994). Raspad tverdyykh ulegazovykh rastvorov [Solid coal-gas solutions decomposition]. *Fiziko-tekhnicheskiie problem razrabotki poleznykh iskopaemykh – Physical and technical problems of mining, 3, 65-75 [in Russian].*
14. Plaksin, M.S., Riabtsev, A.A., & Sukhorukov, V.A. (2010). Otsenka gazodinamicheskoi aktivnosti uglemetanovykh plastov pri vedenii gornykh rabot i planirovanie obemov izvlecheniia poputnogo metana [Estimation of coal-methane seams gas-dynamic activity during mining operations and side methane extraction amount planning]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 1, 43-50 [in Russian].*
15. Shinkevich, M.V., & Leontieva, Ye.V. (2015). Modelirovanie tekhnogennoi strukturizatsii vmeshchaiushchego massiva gornykh porod pri vedenii ochildnykh rabot [Modeling of bedding rock massif technogenic structuring in the course of coal extraction operations]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Herald of Kuzbass State Technical University, 3, 23-31 [in Russian].*
16. Kozyreva, Ye.N., Shinkevich, M.V., Leontieva, Ye.V., Bulanchikov, S.P., & Oslapovsky, S.F. (2016). Primenenie parametricheskoi modeli razvitiia ierarkhii geostруктур v massive gornykh porod dlia proektirovaniia parametrov vyiemochnykh uchastkov [Application of a parametric model for the geostructures hierarchy development in a rock massif for the extraction section parameters design]. *Naukoiemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniia mineralnykh resursov – High technology of development and use of mineral resources, 2, 54-63 [in Russian].*
17. Instruktsiia po degazatsii ugolnykh shakht [Coal mine degassing instruction]. Zakrytoe akcionerное obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskij tsentr issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti» - Industrial Safety Problems Scientific-Technical Research Center, 2015, [in Russian].



**Е. Н. Козырева // Ye. N. Kozyreva**  
gas\_coal@icc.kemsc.ru

канд. техн. наук, заведующий лабораторией ФГБУН «ФИЦ УУХ СО РАН», Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10  
candidate of technical sciences, laboratory head of Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky Avenue, Kemerovo, 650065, Russia



**М. В. Шинкевич // M. V. Shinkevich**  
gas\_coal@icc.kemsc.ru

канд. техн. наук, старший научный сотрудник, Институт угля ФГБУН «ФИЦ УУХ СО РАН», Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10  
leading engineer of Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Leningradsky Avenue, Kemerovo, 650065, Russia



**С. Р. Смирнов // S. R. Smirnov**  
Smirnov.SR@mmk-coal.ru

заместитель главного инженера по технологии, Шахта «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-УГОЛЬ», Россия, 652632, г. Белово, ул. Промышленная, 1  
Deputy Chief Engineer for Technology, "Chertinskaya-Koksovaya" Mine LLC "MMK-UGOL", 10, Ulitsa Promyshlennaya, Belovo, 652632, Russia



**В. Ф. Исамбетов // V. F. Isambetov**  
isambetov@gmail.com

главный инженер Шахта «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-УГОЛЬ», Россия, 652632, г. Белово, ул. Промышленная, 1  
Chief Engineer, "Chertinskaya-Koksovaya" Mine LLC "MMK-UGOL", 10, Ulitsa Promyshlennaya, Belovo, 652632, Russia

УДК 622.831

## НЕОБХОДИМОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПЛАСТОВОЙ ДЕГАЗАЦИИ ПО УТОЧНЕННОЙ ГАЗОНОСНОСТИ ПЛАСТА (НА ПРИМЕРЕ ЛАВЫ № 449 ШАХТЫ «ЧЕРТИНСКАЯ-КОКСОВАЯ»)

### NECESSITY TO USE THE SEAM DEGASSING ACCORDING TO THE SEAM VERIFIED GAS CONTENT (ON THE EXAMPLE OF THE LONGWALL NO. 449 OF "CHERTINSKAIA-KOKSOVAIA" MINE)

*В статье изложены исследования горно-технологической ситуации при отработке пласта 4 Чертинского месторождения Кузбасса. В пределах горного отвода шахты «Чертинская-Коксовая» ООО «ММК-УГОЛЬ» выполнена оценка по геологоразведочным данным горно-геологических условий залегания обрабатываемого пласта и построены электронные карты природной газоносности, глубины залегания, природной газодинамической активности пласта, выхода летучих веществ, мощности междупластий. С учетом полученных ранее экспериментальных результатов установлено, что при отработке длинных выемочных столбов особенности газогеохимических процессов в углегазоносном массиве характеризуются волнообразностью, выполнено моделирование геомеханических процессов в окрестности выемочного столба № 449 с оценкой влияния отработки нижележащего пласта на состояние пласта 4. Установлено, что при предварительной отработке выемочных участков на пласте 5 произошло значительное снижение природной газоносности пласта 4. Однако в местах оставления целиков на пласте 5 возможно сохранение природной газоносности пласта 4 и повышенное метановыделение при отработке лавы № 449. Приведены результаты шахтных экспериментов по отбору проб угля из горных выработок и результаты лабораторных испытаний с отобранными пробами по определению газокинетических характеристик угля. Работы выполнялись по методике, разработанной в Институте угля ФИЦ УУХ СО РАН. Выполнены аналитические исследования газокинетических процессов по экспериментальным данным и уточнена природная газоносность пласта 4 в местах отбора проб. Построена карта уточненной природной газоносности пласта 4 в пределах выемочного участка № 449, на основании которой выполнено обоснование необходимости применения предварительной пластовой дегазации.*

*In the article the mining technological situation research of Kuzbass Chertinski deposit seam 4 is described. Within mining lease of "Chertinskaiia-Koksovaia" mine ООО "ММК-УГОЛЬ" estimation of the seam under work bedding geological conditions on geological survey data is done and electronic maps of the natural gas content, bedding depth, natural gas dynamic properties of the seam, volatiles emission, interseam thicknesses*

were constructed. Taking into account the experimental results obtained earlier, it is established that when working out long pillars, the features of gas-geomechanical processes in the coal-gas-bearing massif are characterized by undulation, modeling of geomechanical processes in the vicinity of the longwall pillar No. 449 with the estimation of the effect of working the lower seam on condition of seam 4. It was established that when coal extraction was preliminarily done at seam 5, the natural gas content of seam 4 decreased significantly. However, in the places where pillars at seam 5 were left, it is possible to have the natural gas content of seam 4 and to have the increased methane emissions when working out the longwall No. 449. The results of mine experiments on sampling coal from mine workings and the results of laboratory tests with selected samples for determining the gas kinetic characteristics of coal are given. The works were carried out according to the methodology developed at the Institute of Coal FIC UUKh SB RAS. Analytical studies of gas-kinetic processes on experimental data are performed and the natural gas content of seam 4 at the sampling points is specified. A map of the specified natural gas content of seam 4 was constructed within the extraction section No. 449, on the basis of which the preliminary seam degassing applying necessity substantiation was carried out.

**Ключевые слова:** УГОЛЬНЫЙ ПЛАСТ, ГАЗОНОСНОСТЬ, ГЕОМЕХАНИЧЕСКАЯ СТРУКТУРИЗАЦИЯ МАССИВА, ШАХТНЫЙ И ЛАБОРАТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ, ПРОБА УГЛЯ, ДЕГАЗАЦИЯ

**Key words:** COAL SEAM, GAS CONTENT, MASSIF GEO-MECHANICAL STRUCTURING, MINE AND LABORATORY TEST, COAL SAMPLE, DEGASSING

**В**ведение. Основой решения задач по повышению газовой безопасности при ведении горных работ на шахте, и, в частности, по применению комплексной схемы управления газовыделением на выемочном участке, включающей средства вентиляции и дегазации, является достоверная информация о газокинетических характеристиках угольных пластов и их природной газоносности. В соответствии с требованиями «Инструкции по дегазации угольных шахт» (п.п. 5, 6, 7) [1] и «Правил безопасности в угольных шахтах» (п. 166) [2], необходимо применять дегазацию угольного пласта на участках ведения горных работ при газоносности пласта  $13 \text{ м}^3/\text{т с.б.м.}$  и более. Предотвращение опасных газовых ситуаций возможно только при заблаговременном выборе средств управления газовыделением. Принятию эффективных инженерных решений при планировании горных работ способствуют новые научные знания о процессах выделения метана из угольных пластов в условиях изменения напряженно-деформированного состояния массива горных пород, а также, о процессах, возникающих в массиве горных пород при выемке пласта угля [3–7].

С целью обоснования необходимости применения предварительной дегазации отрабатываемого пласта (на примере лавы № 449 Шахты «Чертинская-Коксовая») выполнены следующие горно-экспериментальные работы и аналитические исследования.

**Объект исследования.** Выемочный блок лавы № 449 расположен в северо-западной части шахтного поля и находится в целиках, так как это первый выемочный участок в порядке отработки столбов по пласту 4. Длина выемочного

столба по простиранию –  $2200 \text{ м}$ , длина лавы по падению –  $228 \text{ м}$ . Пласт 4 мощностью около  $1,5 \text{ м}$  залегает на глубине  $150 \div 320 \text{ м}$ . Пласт опасен по внезапным выбросам угля и газа с глубины  $300 \text{ м}$ , опасен по взрывчатости угольной пыли, с глубины  $200 \text{ м}$  опасен по горным ударам, не склонен к самовозгоранию.

**Оценка горно-геологических условий залегания пласта 4.** Оценка выполнена на участке горного отвода шахты по геологоразведочным данным с применением методов пространственного моделирования, что позволяет учесть объемную изменчивость газокинетических свойств массива [8], в том числе в пределах выемочных столбов, и существенно повысить точность прогноза газопроявлений при ведении горных работ. Построены электронные карты природной газоносности, глубины залегания пласта (рис. 1), его природной газодинамической активности, выхода летучих веществ и мощности междупластий. Предварительно установлено, что в пределах рассматриваемой лавы природная газоносность пласта 4 (до начала ведения горных работ по пласту 5) превышала  $13 \text{ м}^3/\text{т с.б.м.}$  Однако учитывая, что на шахте выполняется опережающая отработка защитных пластов, то на момент подготовки лавы № 449 потребовалось выполнить геомеханическое обоснование снижения газоносности пласта 4 в результате изменения напряженного состояния горного массива.

**Геомеханическое обоснование.** Ранее экспериментально подтверждено, что изменения параметров газогеохимических процессов в углегазоносном массиве при отработке длинного выемочного столба характеризуются волнообразностью [9]. Для расчета параметров процессов сдвижений и разгрузки вмещающего

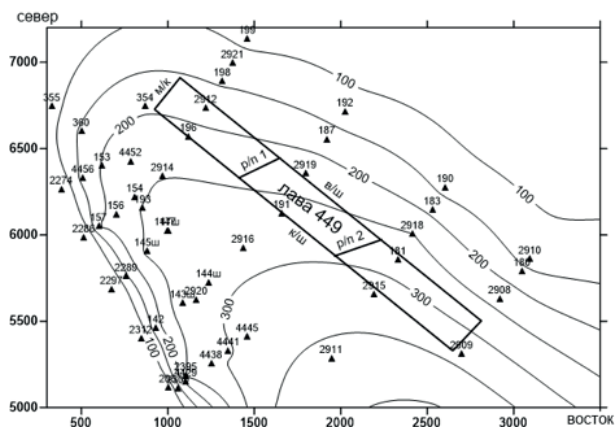


Рисунок 1 – Карта глубины залегания пласта 4, расположение геологоразведочных скважин и лавы № 449 на участке горного отвода шахты «Чертинская-Коксовая»  
 Figure 1 – The map of the depth of occurrence of the coal seam 4, the location of geological exploration wells and lava No. 449 at the mining site section of the "Chertinskaya-Koksovaya" mine

массива при отработке выемочных участков физической основой послужила параметрическая модель структуризации вмещающего массива по геомеханическим слоям [10, 11]. Применение этой модели для проектирования параметров выемочных участков и расчетов параметров скважин для дегазации сближенных пластов для условий шахты «Чертинская-Коксовая» доказало ее адаптивность к конкретным горно-технологическим условиям [12]. Модель основана на современных достижениях нелинейной геомеханики [13] и уточняет закономерности классической геомеханики.

Так как реализация упругой энергии пород начнется от выработанного пространства выемочного участка к дневной поверхности, то процесс разгрузки ближайших к отработываемому пласту геомеханических слоев в начальной стадии будет носить относительно хаотичный характер. По мере вертикального развития фронта разгрузки к границе свода лавы он приобретет системный характер. В результате, внутри свода лавы формируется иерархия вложенных сводов с параметрами кратными длине очистного забоя. Следствием структуризации массива при отработке лавы на пласте 5 является частичная разгрузка от горного давления и снижение газоносности пласта 4, попадающего в зону подработки, как показано на рисунке 2 на примере лавы 571.

Исходя из рассмотренной геомеханической ситуации, можно утверждать о снижении природной газоносности пласта 4 в результате предварительной отработки выемочных участков на нижележащем пласте. Но в местах, где пласт 5 не отработан (целики под железную дорогу, охранные целики у уклонов, бремсбергов и др.) возможно повышенное метановыделение

при проходе лавы № 449. Поэтому для принятия решения о необходимости применения предварительной пластовой дегазации выполнено уточнение газоносности пласта 4 по горно-экспериментальным данным. С этой целью были проведены шахтные эксперименты по отбору проб угля, лабораторные и численные эксперименты с учетом рекомендаций нормативного документа [14].

**Шахтные, лабораторные и аналитические исследования.** Горными выработками, из которых выполнялось бурение скважин и отбор угольных проб, были выбраны: вентиляционный штрек 449, разрезная печь 449-1, конвейерный штрек 449. Способ отбора проб заключался в бурении скважин из горной выработки в угольный пласт за зону разгрузки пласта от геостатического давления, выбуривании из угольного пласта штыба, его отбора в специальный пробоотборник – термобарометрическую колбу [15], оснащенную электронной системой непрерывного контроля давления и температуры газа, выделяющегося в замкнутый объем (рисунок 3). Дешифровка показаний датчиков для анализа термобарических характеристик процесса газовыделения выполнялась по специальной программе.

После заполнения колбы углем, она герметизировалась, доставлялась в лабораторию, помещалась в термостат и выдерживалась при температуре 20 °С. Всего было отобрано 55 проб.

Лабораторные эксперименты с пробами выполнялись путем измерения давления газа в колбах и объемов выделившегося газа, проведе-

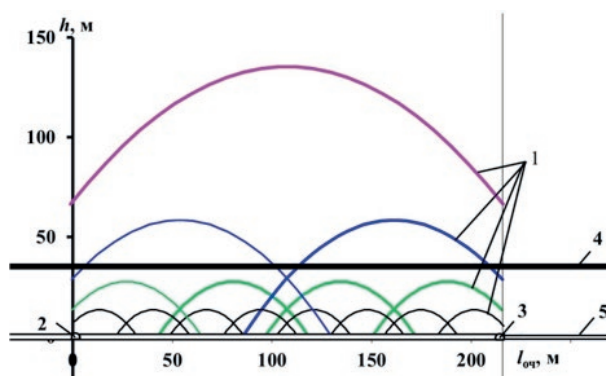


Рисунок 2 – Вертикальная схема геомеханической структуризации вмещающего массива по длине  $l_{оч}$  лавы 571 (вид со стороны монтажной камеры 571).

1 – границы развития фронта разгрузки до свода лавы; 2 – вентиляционный штрек 571; 3 – конвейерный штрек 571; 4 – пласт 4; 5 – пласт 5; h – расстояние от разрабатываемого пласта 5

Figure 1 – Vertical scheme of the geomechanical structuring of the enclosing array along the length  $l_{оч}$  of the lava 571 (view from the side of the mounting chamber 571).

1 – boundaries of development of the unloading front to the lava arch; 2 – airway 571; 3 – belt entry 571; 4 – seam 4; 5 – seam 5; h – distance from the developed seam 5





Рисунок 3 – Термобарометрическая колба: а) общий вид; б) в разрезе  
Figure 3 – Thermobarometric flask: а) general view; б) cutaway

Таблица 1 – Характеристики пласта 4 в местах отбора проб угля  
Table 1 - Characteristics of seam 4 at coal sampling points

Характеристика пласта 4 в месте отбора проб	№ шахтного эксперимента, дата проведения				
	I 19.02.16	II 08.11.16	III 01.12.16	IV 14.12.16	V 31.01.17
Глубина залегания от дневной поверхности, м	210	225	325	320	220
Природная газоносность до начала ведения горных работ, м <sup>3</sup> /т с.б.м.	18	20	24	24	20
В зоне/вне зоны (+/–) влияния горных работ по пласту 5	+	–	+	+	–
Максимальная глубина бурения, м * - в плоскость движущегося забоя подготовительной выработки * * - в тело выемочного столба	6*	5,5*	17**	15,6**	16,2**
Среднее время на отбор одной пробы, мин	1,26	1,38	1,88	2,52	1,53
Количество отобранных проб угля, шт.	11	12	10	11	11
Уточненная природная газоносность (максимальное значение из серии проб), м <sup>3</sup> /т с.б.м.	7,7 (9,93)	9,87 (10,35)	9,83 (11,55)	9,55 (10,04)	9,86 (10,6)

ния технического анализа и определения гранулометрического состава угля.

В результате проведенных аналитических исследований получены зависимости динамики выделения метана из угля. Рассчитаны упущенные при отборе проб объемы газа, начальная скорость газоотдачи, остаточная газоносность и уточнена природная газоносность пласта 4 в местах отбора проб углей.

Основные данные о характеристиках пласта 4 для пяти серий шахтных экспериментов по отбору проб на выемочном участке № 449 шахты «Чертинская-Коксовая» приведены в таблице 1.

Причина снижения природной газоносности пласта 4 более чем в 2 раза по сравнению с периодом до начала ведения горных работ заключается в его подработке выемочными участками по пласту 5. В местах отбора проб III и IV пласт 4 был полностью подработан лавой 567, коэффициент снижения газоносности в них наибольший – 0,6 и 0,59, соответственно. В местах отбора проб II, V (частичная подработка пластом 5) коэффициент снижения газоносности составляет 0,51. Причиной снижения газоносности пласта 4 в частично подработанной зоне, расположенной над межлавым целиком (шириной 150

м) пласта 5, является наличие существенных зон разгрузки над лавами 507 и 511 в совокупности с временным фактором (период после отработки лав более 20 лет), которое привело к значительному дегазационному эффекту.

В результате выполненных аналитических исследований газокинетических процессов по экспериментальным данным уточнена природная газоносность пласта 4. Методом интерполяции этих значений построена карта уточненной природной газоносности пласта в пределах выемочного участка № 449 (рисунок 4), на основе которой были разработаны рекомендации по применению пластовой дегазации на выемочном участке № 449 шахты «Чертинская-Коксовая».

#### Заключение.

На выемочном участке № 449 необходимо проводить пластовую дегазацию только в зоне, указанной на рисунке 4 и выделенной серым цветом в пределах границы зоны неустановленной природной газоносности пласта 4, по следующим причинам. Во-первых, возможно сохранение природной газоносности пласта 4 над целиком Т-образной формы на пласте 5, поскольку в этой зоне пласт 4 не подвергся процессу разгрузки; во-вторых, отбор проб на

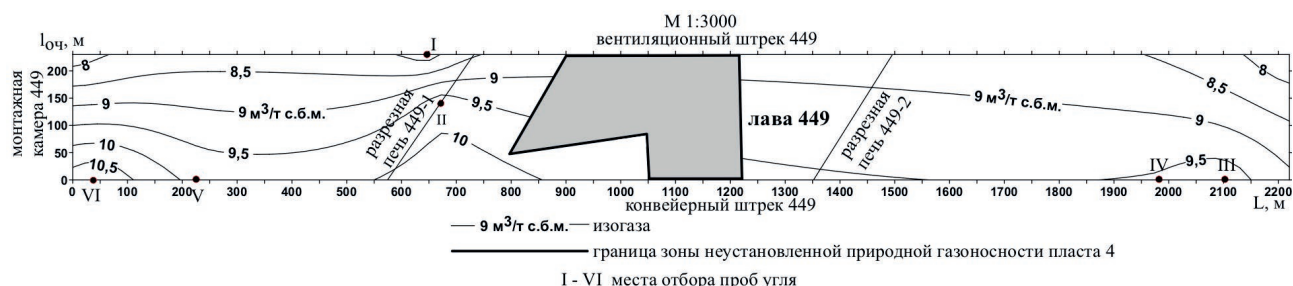


Рисунок 4 – Карта уточненной природной газоносности пласта 4 в пределах выемочного участка № 449 по его длине L  
Figure 4 – The map of the specified natural gas content of the coal seam 4 within the excavation site No. 449 along its length L

уточнение природной газоносности в этой зоне не выполнялся. На остальной части выемочного участка проведение пластовой дегазации нецелесообразно, так как природная газоносность пласта 4 не превышает  $13 \text{ м}^3/\text{т с.б.м.}$

Предложенное решение по применению пластовой дегазации на выемочном участке № 449 согласуется с принятыми проектными ре-

шениями, изложенными в соответствующем проекте, разработанном ООО «Научно-проектным центром ВостНИИ», и соответствует требованиям законодательства Российской Федерации – федеральным законам «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», «О недрах», «Об основах охраны труда в Российской Федерации» и др.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2015. – 250 с.
2. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности в угольных шахтах». Серия 05. Выпуск 40. – М.: Закрытое акционерное общество «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2014. – 200 с.
3. Тайлаков, О.В. Определение газоносности угольных пластов на основе исследования процессов фильтрации и диффузии метана / О.В. Тайлаков, А.Н. Кормин, Д.Н. Застрелов, Е.А. Уткаев // Уголь. – 2015. – № 1. – С. 74–77.
4. Черданцев, Н.В. О некоторых условиях наступления предельного состояния кровли угольного пласта при его отработке очистной выработкой / Н.В. Черданцев // Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 5. – С. 17–23.
5. Шадрин, А.В. Совершенствование методов автоматизированного прогноза опасности проявления динамических явлений в процессе разупрочнения кровли и профилактической гидрообработки угольных пластов / А.В. Шадрин, В.И. Клишин // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. – 2017. – № 3. – С. 31–35.
6. Klishin, V.I. Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification / Klishin V.I., Opruk G.Y., Tatsienko A.L. // В сборнике: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya" 2017. С. 012019.
7. Портола, В.А. Способы обнаружения и локации очагов подземных пожаров / В.А. Портола, А.А. Дружинин, В.И. Храмов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. С. 103–108.
8. Козырева, Е.Н. Методические основы автоматизированной оценки распределения газового потенциала вмещающего массива / Е.Н. Козырева, А.А. Рябцев, О.В. Граничева, М.С. Плаксин, Е.В. Леонтьева, Р.И. Родин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 3. – С. 20–26.
9. Полевщиков, Г.Я. Нелинейные изменения метанообильности высокопроизводительного выемочного участка / Г.Я. Полевщиков, Е.Н. Козырева, М.В. Шинкевич // Безопасность труда в промышленности. – 2014. – № 6. – С. 50–54.
10. Козырева, Е.Н. Параметрическая модель техногенного развития иерархии геоструктур в массиве горных пород / Е.Н. Козырева, М.В. Шинкевич, Е.В. Леонтьева // Научные технологии разработки и использования минеральных ресурсов: сб. науч. статей / Сиб. Гос индустр. Ун-т; под общей ред. В.Н. Фрянова. – Новокузнецк, 2015. – С. 143–148.
11. Шинкевич, М.В. Взаимосвязи основных особенностей процессов разгрузки и сдвижения вмещающих пород с динамикой выделения метана из разрабатываемого пласта при его отработке длинными выемочными столбами / М.В. Шинкевич, Е.Н. Козырева // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2006. – № 6. – С. 17–19.
12. Козырева, Е.Н. Определение параметров скважин дегазации с учетом структуризации вмещающего массива (на примере лавы № 560 шахты «Чертинская-Коксовая») / Е.Н. Козырева, Е.В. Леонтьева, С.П. Буланчиков, С.Ф. Ослаповский // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2016. – № 4. – С. 22–28.
13. Шемякин, Е.И. Открытие № 400. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок. / Е.И. Шемякин, М.В. Курленя, В.Н. Опарин, В.Н. Рева, Ф.П. Глушихин, М.А. Розенбаум // Боспорские исследования. – 1992. – № 1.
14. Инструкция по определению и прогнозу газоносности угольных пластов и вмещающих пород при геологоразведочных работах (Утв. Министерством геологии СССР ГКЗПИ при Совете Министров СССР). – М.: Недра,

1977. – 96 с.

15. Руководство по определению безопасных технологических параметров проведения подготовительных выработок по выбросоопасным зонам угольных пластов, Кемерово, ВостНИИ, 1978 г. – 24 с.
16. Патент RU 2526962 C1, E21F7/00 (2006/01) «Способ определения газокинетических характеристик угольного пласта» / Г.Я. Полевщикова, А.А. Рябцев, Е.С. Непейна, Е.М. Цуран, В.П. Титов, Е.А. Ванин, М.С. Мельгунов, Л.А. Назарова, Л.А. Назаров; Заявлено 18.06.2013; Опубликовано 27.08.2014, Бюл. № 24; Приоритет 18.06.2013.

## REFERENCES

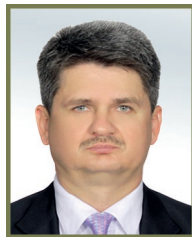
1. *Instruktsia po degazatsii ugolnykh shakht [Coal mines degassing instruction].* (2015). Moscow: Zakrytoe aktsionerное obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskii tsentr issledovaniy problem promyshlennoi bezopasnosti» [in Russian].
2. *Federalnye normy i pravila v oblasti promyshlennoi bezopasnosti «Pravila bezopasnosti v ugolnykh shakhtakh» [Federal rules and regulations in the field of industrial safety "Safety Rules in Coal Mines"].* (2014). Moscow: Zakrytoe aktsionerное obshchestvo «Nauchno-tekhnicheskij centr issledovaniy problem promyshlennoj bezopasnosti» [in Russian].
3. Tailakov, O.V., Kormin, A.N., Zastrel'ov, D.N., & Utkaev Ye.A. (2015). Opredelenie gazonosnosti ugolnykh plastov na osnove issledovaniia protsessov filtratsii i diffuzii metana [Coal seams gas content determination based on methane filtration and diffusion processes study]. *Ugol – Coal*, 1, 74-77 [in Russian].
4. Cherdantsev, N.V. (2017). O nekotorykh usloviakh nastupleniia predelnogo sostoiianiia krovli ugolnogo plasta pri iego otrabotke ochnistnoi vyrabotkoi [On some conditions for the approach of the coal seam roof limit condition at its development by an extraction working]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti – Occupation Safety In Industry*, 5, 17-23 [in Russian].
5. Shadrin, A.V., & Klishin, V.I. (2017). Sovershenstvovanie metodov avtomatizirovannogo prognoza opasnosti proiavleniia dinamicheskikh iavlenii v protsesse razuprochneniia krovli i profilakticheskoi gidroobrabotki ugolnykh plastov [Dynamic phenomena manifestation danger automated forecasting improvement methods in the process of roof weakening and coal seams preventive hydro-treatment]. *Vestnik Nauchnogo tsentra VostNII po promyshlennoi i ekologicheskoi bezopasnosti – Herald of Industrial and Environmental Safety Scientific Center VostNII*, 3, 31-35 [in Russian].
6. Klishin, V.I., Opruk G.Y., & Tatsienko A.L. (2017). Technology and means of a coal seam interval hydraulic fracturing for the seam degassing intensification. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Ser. "All-Russian Conference on Challenges for Development in Mining Science and Mining Industry Devoted to the 85th Anniversary of Academician Mikhail Kurlenya"* [in English].
7. Portola, V.A., Druzhinin, A.A., & Khramtsov, V.I. (2014). Sposoby obnaruzheniia i lokatsii ochagov podzemnykh pozharov [Underground fire spots detection and location methods]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Industrial Safety*, 1, 103-108 [in Russian].
8. Kozyreva, Ye.N., Riabtsev, A.A., Granicheva, O.V., Plaksin, M.S., Leontieva, Ye.V., & Rodin, R.I. (2016). Metodicheskie osnovy avtomatizirovannoi otsenki raspredeleniia gazovogo potentsiala vmeshchaiushchego massiva [Enclosing massif gas potential distribution automated estimation method basis]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Industrial Safety*, 3, 20-26 [in Russian].
9. Polevshchikov, G.Ya., Kozyreva, Ye.N., & Shinkevich, M.V. (2014). Nelineinye izmeneniia metanoobilnosti vysokoproizvoditelnogo vyemochnogo uchastka [Nonlinear changes in the methane inflow of a high-performance extraction section]. *Bezopasnost truda v promyshlennosti – Occupation Safety In Industry*, 6, 50-54 [in Russian].
10. Kozyreva, Ye.N., Shinkevich, M.V., & Leontieva, Ye.V. (2015). Parametricheskaya model tekhnogennogo razvitiia ierarkhii geostruktur v massive gornykh porod [Geostructures hierarchy technogenic development parametric model in a rock massif]. *Naukoemkie tekhnologii razrabotki i ispolzovaniia mineralnykh resursov: sb. nauch. Ctatej - High technology of development and use of mineral resources: collection of articles, Novokuznetsk, Siberian State Industrial University* [in Russian].
11. Shinkevich, M.V., & Kozyreva, Ye.N. (2006). Vzaimosviazi osnovnykh osobennostei protsessov razgruzki i sdvizeniia vmeshchaiushchikh porod s dinamikoi vydeleniia metana iz razrabatyvaiemogo plasta pri iego otrabotke dlinnymi vyemochnymi stolbami [Enclosing rocks unloading and shifting processes main features interrelationships with the methane emission dynamics from the developed seam when it is worked out by long extraction pillars]. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Herald of Kuzbass State Technical University*, 6, 17-19 [in Russian].
12. Kozyreva, Ye.N., Leontieva, Ye.V., Bulanchikov, S.P., & Oslapovsky, S.F. (2016). Opredelenie parametrov skvazhin degazatsii s uchetom strukturizatsii vmeshchaiushchego massiva (na primere lavy № 560 shakhty «Chertinskaya-Koksovaya») [Degassing wells parameters determination taking into account the structuring of the enclosing massif (for example, longwall No. 560 of the "Chertinskaya-Koksovaya" mine)]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Industrial Safety*, 4, 22-28 [in Russian].
13. Shemiakin, Ye.I., Kurlenia, M.V., Oparin, V.N., Reva, V.N., Glushikhin, F.P., & Rosenbaum, M.A. (1992). Otkrytie № 400. Yavleniie zonalnoi dezintegratsii gornykh porod vokrug podzemnykh vyrabotok [Discovery No. 400. The phenomenon of zonal disintegration of rocks around underground openings]. *Bospor Researches*, 1 [in Russian].
14. *Instruktsiya po opredeleniyu i prognozu gazonosnosti ugolnykh plastov i vmeshchayushchikh porod pri geologorazvedochnykh rabotakh [Instructions for determining and forecasting the gas content of coal seams and enclosing rocks during geological exploration]* Moscow: Nedra. *Rukovodstvo po opredeleniyu bezopasnykh tekhnologicheskikh parametrov provedeniia podgotovitelnykh vyrabotok po vybrosopasnym zonam ugolnykh plastov [Guidelines for the definition of safe technological parameters for carrying out preparatory openings at the outburst dangerous areas of coal seams]*. Кемерово: VostNII [in Russian].
15. Polevshchikov, G.Ya., Riabtsev, A.A., Nepeina, Ye.S., Tsuran, Ye.M., Titov, V.P., Vanin, Ye.A., Melgunov, M.S., Nazarova, L.A., & Nazarov, L.A. (2013). *Patent RU 2526962 C1, E21F7/00 (2006/01)* [in Russian].

## II. ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ II. FIRE AND INDUSTRIAL SAFETY



**С. А. Лисаков // S. A. Lisakov**  
foxlsa@mail.ru

инженер кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
chair engineer of Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia



**Е. В. Сыпин // Ye. V. Syrin**  
sev@bti.secna.ru

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
candidate of technical sciences, chair professor of Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia



**Н. Ю. Тупкина // N. Yu. Tupikina**  
tnu@bti.secna.ru

старший преподаватель кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
senior Lecturer of Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia



**Ю. А. Галенко // Yu. A. Galenko**

д-р физ.-мат. наук, профессор Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
doctor of phys.-math. sciences, chair professor of Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia



**О. Б. Кудряшова // O. B. Kudryashova**

д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», Институт проблем химико-энергетических технологий СО РАН 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1  
doctor of phys.-math. sciences, associate professor, chair professor of Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University, Institute of Chemical Energy Technologies' Problems SB RAS, 1, Socialist Street, Biysk, 659322, Russia



**А. Н. Павлов // A. N. Pavlov**  
pan@bti.secna.ru

канд. техн. наук, доцент Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
candidate of technical sciences, associate professor of Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia

УДК 536.46/614.83

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ METHANE-AIR MIXTURE NONSTATIONARY COMBUSTION PROCESS IN COAL MINES MODELING TASK STATEMENT

*Рассмотрены механизмы ускорения пламени и перехода горения в детонацию в условиях угольной шахты. Проанализированы подходы к исследованию ускорения пламени и перехода горения в детонацию. Проанализированы подходы к моделированию турбулентных течений при нестационарном горении. Программный комплекс FlowVision выбран для проведения моделирования. Сформулированы исходные данные для выполнения моделирования. Исследование предполагается выполнять на базе численного моделирования процесса нестационарного горения стехиометрической метано-воздушной смеси с использованием следующих моделей: модель на базе осредненных нестационарных (URANS) уравнений Навье-Стокса; стандартная k-ε модель турбулентности; модель горения на базе одностадийной необратимой реакции горения; модель скорости брутто-реакции – модель вихревой*

диссипации (EDM); моделирование излучения – диффузионная модель P-1; модель переноса энергии излучением – модель взвешенной суммы серых газов (WSGGM). Моделирование предполагается выполнять для трубы с одним закрытым и одним открытым концом и препятствиями внутри трубы, при этом поджиг располагать у закрытого конца. Препятствиями, турбулизирующими горение, являются кольцевые перегородки с геометрическими параметрами, соответствующими размерам крепи в угольных шахтах.

*The mechanisms of the flame acceleration and combustion transition to detonation in a coal mine conditions are considered. Approaches are analyzed to the flame acceleration study and combustion transition to detonation; to the turbulent flows in nonstationary combustion modeling. For modelling the FlowVision software package is chosen. The modeling initial data is formulated. The study is supposed to be performed on the basis of numerical modeling of a stoichiometric methane-air mixture nonstationary combustion process using the following models: model based on the averaged non-stationary (URANS) Navier-Stokes equations; the standard k-ε model of turbulence; the combustion model on the basis of a one-stage irreversible combustion reaction; the model of the gross-reaction rate - the vortex dissipation model (EDM); radiation modeling - diffusion model P-1; the model energy transfer by radiation - the weighted sum model of gray gases (WSGGM). Modeling is supposed to be performed for a pipe with one closed and one open end and obstacles inside the pipe, while igniting it at the closed end. The obstacles turbulizing combustion are annular septa with geometric parameters corresponding to the dimensions of the support in coal mines.*

**Ключевые слова:** НЕСТАЦИОНАРНОЕ ГОРЕНИЕ, МЕТАНО-ВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ, ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, УГОЛЬНАЯ ШАХТА, ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ

**Key words:** NONSTATIONARY COMBUSTION, METHANE-AIR MIXTURE, DIGITAL MODELING, COAL MINE, TRANSITION OF COMBUSTION INTO DETONATION

**В**ведение  
Аварии, связанные с воспламенением (взрывом) метана и угольной пыли в угольных шахтах происходят достаточно часто, являются тяжелыми по последствиям и, как правило, сопровождаются гибелью людей. В мировой практике развитие оборудования взрывозащиты для угольных шахт ведется по пути создания принципиально новых средств – автоматических систем, способных локализовать взрыв на начальной стадии развития. Для обеспечения максимального быстродействия такие системы строятся на базе оптико-электронных датчиков и устройств взрывоподавления [1-8].

Актуальной задачей является разработка научных основ для создания автоматических систем взрывоподавления на базе оптико-электронных датчиков, способных оценивать скорость и ускорение фронта пламени и в зависимости от нее оперативно принимать решения по способу локализации горения до перехода его в детонацию.

Для создания и совершенствования автоматических систем взрывоподавления необходимы данные о механизмах возникновения и развития горения в условиях шахт.

В настоящее время в большей мере изучены процессы низкоскоростного горения (на начальной стадии) как основной причины аварий в шахтах [3, 9-12]. Вместе с тем последующие стадии развития горения (ускорение низкоско-

ростного пламени вплоть до перехода горения в детонацию) представляют немалый практический интерес, хотя и изучены в меньшей степени [3, 4]. Турбулизирующее влияние шероховатых стенок выработки, препятствий в виде оборудования или возмущающее движение воздуха (при процессе принудительной вентиляции в шахте) приводит к переходу нормального горения горючей смеси в результате самоускорения в детонацию. При этом скорость фронта пламени может увеличиться на 2-3 порядка (от 3-5 м/с до 1800 м/с) за малый промежуток времени порядка 10-25 мс. Последствия по динамическому воздействию процесса нестационарного горения являются катастрофическими, поэтому важно обнаружить горение как можно раньше и локализовать его, не допустив ускорения процесса [1-3].

Существующие системы, как правило, работают без учета скорости фронта пламени, и в случае его ускорения локализуется только часть зоны горения.

Существующие системы выполняют обнаружение горения на ранней стадии, когда видимая скорость фронта пламени составляет несколько метров в секунду (1-3 м/с), определяют его пространственное расположение и локализуют возникшее горение в течение времени порядка 30-40 мс [13-18].

Также известна система АСВП-ЛВ [19], предназначенная для локализации горения распространяющегося со скоростью фронта пламени 40-500 м/с, недостатком которой является то,

что система приводится в действие на позднем этапе горения при возникновении ударной воздушной волны. Следовательно, система имеет низкую эффективность и для организации взрывозащиты выработки требуется установка большого количества таких систем.

Для борьбы с возгоранием в стадии увеличения скорости требуются совсем другие принципы построения систем подавления горения, знания механизма развития горения и его ускорения.

Необходимые исследования в данной области выполняются в рамках проекта «Разработка научных основ построения распределённой оптико-электронной системы обнаружения и локализации нестационарного горения на потенциально опасных промышленных объектах» (грант РФФИ №17-08-00844).

Начальными этапами выполнения проекта являются:

- исследование на базе математического моделирования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси для условий характерных для угольных шахт;

- исследование на базе математического моделирования оптического излучения продуктов горения при нестационарном горении метано-воздушных смесей.

Целью настоящей работы является выполнение постановки задачи моделирования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах.

В рамках выполнения постановки задачи моделирования необходимо решить следующие задачи:

- рассмотреть механизмы ускорения пламени и перехода горения в детонацию для типичных условий угольных шахт;

- проанализировать подходы к исследованию ускорения пламени и перехода горения в детонацию. По результатам анализа выбрать приемлемый подход для проведения исследования для типичных условий угольных шахт;

- проанализировать подходы к моделированию турбулентных течений при нестационарном горении. По результатам анализа выбрать подход к моделированию турбулентного течения, модель горения, модель оптического излучения для типичных условий угольных шахт. Выбрать программный комплекс для выполнения моделирования; сформулировать исходные данные для моделирования с учётом типичных условий для угольных шахт.

**Механизмы ускорения пламени и перехода горения в детонацию для типичных ус-**

#### **ловий угольных шахт.**

Взрывоопасность угольных шахт определяется следующими условиями:

- наличие в рудничной атмосфере метана и угольной пыли, которые образуют различные по виду (богатые, бедные) и степени взрывоопасности смеси;

- возможность внезапного выделения метана и образования взрывоопасной смеси на большой протяженности выработки;

- разнообразие и повышенная опасность возможных источников воспламенения;

- различные по степени опасности виды горения смесей;

- возможность ускорения пламени в процессе развития вплоть до перехода горения в детонацию;

- способность процесса горения перемещаться по горным выработкам на значительные расстояния от источника воспламенения [1, 2].

К механизмам возникновения и развития взрывов относят [1, 2]: тепловой; цепочный; цепочно-тепловой.

В условиях угольных шахт воспламенение метано-воздушной смеси происходит при температурах – 650-750 °С и атмосферном давлении [1, 2].

Для большинства взрывов, характерных для угольных шахт (с участием углеводородо-воздушных смесей), возможен только цепочно-тепловой механизм [2].

При цепочно-тепловом механизме развитие реакции с самого начала происходит (независимо от того, превышает ли скорость выделения тепла скорость его отвода или нет) по цепочному механизму вырожденных разветвлений [2]. Затем реакция ускоряется в основном из-за саморазогрева реакционной среды по тепловому механизму.

При цепочно-тепловом механизме самоускорения реакции нормальная скорость горения для смеси метана с воздухом достигает всего 0,27 м/с, вследствие того что передача тепла от слоя к слою происходит за счет молекулярной теплопроводности, скорость невелика.

В горных выработках шахт на процесс распространения волны горения (пламени) может накладываться турбулизирующее влияние шероховатых стенок выработки, препятствий в виде крепи, оборудования и др. или движение потока вентиляционного воздуха [2, 12]. При этом механизм передачи тепла осуществляется не молекулярной, а турбулентной теплопроводностью и диффузией. Данный механизм передачи тепла происходит с большей скоростью,

в результате происходит ускорение пламени. Помимо этого, скорость пламени увеличивается за счет предварительного нагрева и сжатия метано-воздушной смеси волнами сжатия перед фронтом пламени. Волны сжатия могут привести к возникновению ударной волны [2, 12].

Ударная волна движется со сверхзвуковой скоростью, при этом растет скорость движения, давление и температура метано-воздушной смеси перед фронтом пламени. В результате происходит ускорение горения смеси, а ударная волна может приобрести такую интенсивность, что температура на ее фронте становится достаточной для непосредственного воспламенения газовой смеси, и это может привести к переходу горения газа смеси в его детонацию и возникновению детонационной волны [1, 2, 12].

Механизмы ускорения пламени и перехода горения в детонацию в условиях угольной шахты связаны с видом горения, источником воспламенения, концентрацией метана [1, 2].

Видами горения взрывоопасных смесей в угольной шахте являются [2]:

1) Предварительно смешанное горение является наиболее часто встречающимся и наиболее опасным при воспламенении. Горючая смесь формируется на большом протяжении горных выработок, а ее горение может происходить быстро с образованием мощных ударных волн.

2) Диффузионное горение, при котором горючий рудничный газ и шахтный воздух не были предварительно перемешаны, опасное, но редко встречающееся горение, происходящее уже в процессе взаимного диффузионного смешивания. Диффузионное горение метана не приводит к распространению пламени в объеме горной выработки.

Источниками воспламенения в шахте являются электрическое искрение, детонирующие заряды при взрывных работах и искрение при соударении металлов и др. Минимальная энергия воспламенения метано-воздушной смеси электрической искрой составляет  $0,3 \text{ мДж}$  (для стехиометрической смеси) и увеличивается при отклонении концентрации от стехиометрической.

Увеличение энергии источника воспламенения приводит к увеличению скорости фронта пламени, например, в работе [20] приводятся данные для скорости горения стехиометрической метано-воздушной смеси в гладкой трубе диаметром  $50 \text{ мм}$ , при этом максимальная скорость фронта пламени при энергии источника зажигания  $1 \text{ кДж}$  (пиротехнический воспламени-

тель) равна  $320 \text{ м/с}$ ,  $5 \text{ кДж}$  –  $350 \text{ м/с}$ ,  $10 \text{ кДж}$  –  $410 \text{ м/с}$ . Увеличение энергии воспламенения также приводит к существенному увеличению скорости нарастания давления при взрыве – от 2 до 4 раз (в зависимости от концентрации метана) при изменении мощности от 1 до  $10 \text{ кДж}$  [20].

Скорость распространения горения вдоль выработки увеличивается с ростом концентрации метана в воздухе от 5 % и достигает максимума для стехиометрической смеси – 9,5 %, затем по мере увеличения концентрации снижается до нуля при значениях более 15 % [2].

Таким образом, механизм с цепочно-тепловой передачей тепла за счет турбулентной теплопроводности и диффузии будет использован в дальнейшей работе при определении ускорения пламени и перехода горения в детонацию в условиях угольной шахты. С учетом выбранного механизма необходимо выполнить анализ и сформировать подходы к исследованию и моделированию ускорения пламени и перехода горения в детонацию в угольных шахтах.

#### **Подходы к исследованию ускорения пламени и перехода горения в детонацию в угольных шахтах**

Причины возникновения турбулентного горения в условиях угольных шахт имеют большое разнообразие, следовательно, выбор подходов к исследованию необходимо осуществлять с учетом наиболее вероятного и наиболее опасного по последствиям сценария развития аварии в угольной шахте.

На основе анализа литературы был определен сценарий развития аварии в угольной шахте, включающий 5 этапов [1-4].

Этап I. Загазование тупиковой выработки угольной шахты до взрывоопасной концентрации метано-воздушной смеси.

Характер этапа I определен исходя из того, что по статистике 60 % взрывов произошло в действующих тупиковых выработках [2]. Главной причиной взрывов послужило загазование выработки до взрывоопасной концентрации из-за нарушения режима проветривания.

Этап II. Воспламенение стехиометрической метано-воздушной смеси электрической искрой у закрытого конца тупиковой выработки.

Характер этапа II определяется следующими условиями:

– воспламенение наиболее вероятно в части тупиковой выработки, примыкающей к забою (у закрытого конца) [1].

– наиболее распространенным (по статистике) и опасным источником воспламенения

метано-воздушной смеси является электрическое искрение, за ним следуют взрывные работы и искры от соударения металлов [1, 2]. Воспламенение происходит для начальных температуры и давления в шахте равных  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $105\text{ Па}$  [1].

– наиболее активной и быстрой является реакция горения стехиометрической метано-воздушной смеси (при концентрации метана в воздухе  $9,5\text{ об.}\%$ ).

Этап III. Начальная стадия развития взрыва – ламинарное горение метано-воздушной смеси.

Этап III обоснован следующими условиями:

– крупные аварии наиболее часто начинаются со вспышки метано-воздушных смесей, а только затем переходят во взрыв пылевоздушной смеси.

– горение на начальной стадии, как правило, является ламинарным – с невозмущенным фронтом и происходит в форме огненного шара со скоростями, не превышающими несколько метров в секунду [2].

Этап IV. Происходят ускорение фронта пламени до нескольких сотен метров в секунду при турбулизации фронта горения на препятствиях, расположенных в тупиковой выработке угольной шахты, и возникновение волн сжатия, а также ударных волн при давлении, превышающем  $1\text{ МПа}$ .

Переход процесса горения к IV этапу обоснован следующими условиями:

– наличие различных препятствий в виде шероховатостей стен, крепи и оборудования выработок, крепи сланцевых и водяных заслонов на пути распространения фронта пламени, являющихся основными причинами развития турбулизованного горения. Турбулизованное горение может быть также обусловлено возможным воздействием потока вентиляционного воздуха на фронт пламени.

– ускорение фронта ударной волны взрыва метано-воздушной смеси может перевести во взвешенное состояние отложившуюся угольную пыль и привести к увеличению интенсивности взрыва [1-4].

Этап V. Переход горения в детонацию, возникновение детонационных волн при скорости движения  $1818\text{ м/с}$  и давлении, достигающем  $5\text{ МПа}$ . Возникновение детонации является возможным при достаточно большой протяженности выработки [1-4].

С учетом рассмотренного сценария развития аварии необходимо определить подходы к

исследованию нестационарного горения в угольной шахте.

Известные подходы к теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов нестационарного горения основаны на использовании закономерностей, изложенных в теории горения Щелкиным К.И., Семеновым Н.Н., Зельдовичем Я.Б. и Франк-Каменецким Д.А. в работах [21-24].

Исследования ускорения пламени и перехода горения в детонацию непосредственно связаны с подходами и методами исследований турбулентных течений, а более конкретно – турбулентного горения [25]. Подходы к исследованию турбулентных течений делятся на теоретические (моделирование) и экспериментальные. Теоретические подходы, в свою очередь, включают аналитические и численные методы моделирования.

Исследование предполагается выполнять на базе численного моделирования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах.

Применительно к угольным шахтам современные подходы к моделированию ускорения пламени и перехода горения в детонацию в газозвудушных смесях приведены в работах [26-29]. Экспериментальные данные о характере перехода горения в детонацию метано-воздушных смесей представлены в работах [30-34].

Исследования нестационарного горения в тупиковых выработках угольных шахт сопоставляются с исследованиями дефлаграции, детонации и перехода дефлаграции в детонацию в трубах с одним закрытым и одним открытым концом [30-32]. При этом поджиг горючей предварительно перемешанной смеси выполняется у закрытого конца трубы. Препятствия, турбулизирующие горение, представляют собой кольцевые перегородки, регулярно расположенные по длине трубы, которые могут быть сопоставлены с препятствиями в виде крепи выработок.

Параметрами перегородок являются шаг установки препятствий, пропорциональный диаметру трубы  $S\sim D$ , и степень затенения сечения кольцевыми перегородками  $BR$  (рис. 1). Параметр  $S$  в известных исследованиях изменяется в пределах от  $0,25D$  до  $2D$ . Степень затенения меняется в пределах от  $0,1$  до  $0,75$ , при этом ширина кольцевого препятствия определяется как  $h=(D/2)\cdot BR$  [30-32].

Известные экспериментальные исследования нестационарного горения, как правило, проводятся в трубах с диаметрами меньшими (от  $0,17$  до  $1\text{ м}$ ), чем диаметр шахты ( $3\text{ м}$  и более),





Рисунок 1 – Параметры регулярных препятствий  
Figure 1 – Parameters of regular obstacles

что связано с большой сложностью, трудоемкостью и высокой стоимостью исследований в трубах большого диаметра [30-34].

Следовательно, важно сопоставлять результаты исследований с учетом их масштабируемости на большие диаметры труб. Сопоставление может быть выполнено для экстраполированных экспериментальных данных о расстоянии по длине трубы, при котором происходит переход горения в детонацию в зависимости от диаметра трубы. Данные для труб меньшего диаметра (0,17, 0,5, 1 м) сопоставляются с данными моделирования труб с большим диаметром (3 м) (рис. 2).

Данные экспериментальных исследований, приведенных в работах [31, 32] предполагается использовать для проверки адекватности моделирования, при которой будет проведено

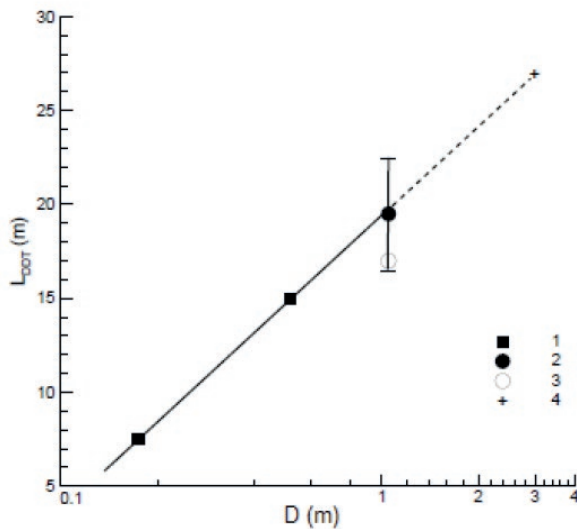


Рисунок 2 – Расстояние перехода горения в детонацию  $L_{DDT}$  в закрытых трубах в зависимости от диаметра трубы  $D$ , для стехиометрической метано-воздушной смеси:  
1 – эксперимент [31],  $BR=0,3$ ,  $S=D=17,4$  и  $52$  см;  
2 – эксперименты [32],  $BR = 0,25$ ,  $d = 1,05$  м,  $S = 1,52$  м;  
3 – расчет [32],  $BR = 0,3$ ,  $S=D= 1,044$  м;  
4 – экстраполяция до  $D = 3$  м  
Figure 2 – The distance of combustion transition into detonation  $L_{DDT}$  in closed pipes, depending on the diameter of the pipe  $D$ , for the stoichiometric methane-air mixture:  
1 – experiment [31],  $BR=0,3$ ,  $S=D=17,4$  и  $52$  см;  
2 – experiments [32],  $BR = 0,25$ ,  $d = 1,05$  м,  $S = 1,52$  м;  
3 – calculation [32],  $BR = 0,3$ ,  $S=D= 1,044$  м;  
4 – extrapolation up to  $D = 3$  м

моделирование экспериментов 1 и 2 и моделирование в экстраполируемой точке 4 для параметров  $BR=0,3$ ,  $S=D=3$  м (рис. 2).

### Подходы к численному моделированию турбулентных течений при нестационарном горении

Численное моделирование турбулентного течения делится на три вида: прямое численное моделирование (DNS), моделирование крупномасштабных вихрей (LES) и осредненных стационарных (SRANS) и нестационарных (URANS) уравнения Навье-Стокса [25, 29, 35-37].

Прямое численное моделирование (DNS) применяется для описания турбулентных течений с низкими значениями  $Re$  для объектов с простой геометрией, при горении предварительно перемешанных и неперемешанных смесей. При решении нестационарных уравнений Навье-Стокса используется мелкий временной шаг и мелкая пространственная сетка, что обуславливает значительные вычислительные затраты. При этом метод применяют редко в научных исследованиях и в основном для оценки возможности использования более простых моделей турбулентности [25].

Модель турбулентности LES используют для расчета течений, в которых основной вклад в энергию турбулентности вносят крупные вихри, обладающие большой массой и импульсом. Данная модель удобна в применении для расчетов нестационарного турбулентного горения. Модель LES по сравнению с DNS отличается более низкими требованиями к вычислительным ресурсам. В последнее время сфера применения LES для расчета горения значительно возросла. Однако, недостатком является то, что в LES не решена проблема пристеночных течений. Вблизи стенки вихри малы и анизотропны, и сеточные и временные шаги, требуемые для LES, по величине сопоставимы с используемыми шагами в DNS. Одним из решений данной проблемы является комбинирование моделей LES и URANS [25, 35].

В инженерной практике для расчета нестационарного горения наиболее часто используется модель турбулентности URANS, с умеренными требованиями к вычислительным ресурсам. Модель предполагает замену случайно изменяющихся характеристик потока (скорость, давление, плотность) суммами осредненных и пульсационных составляющих [25, 35].

При проведении моделирования предполагается использовать URANS модель для расчета турбулентного течения.

В модели турбулентности URANS эффект

турбулентных возмущений описывается тензором напряжений Рейнольдса. Тензор напряжений Рейнольдса используется для замыкания системы уравнений движения и неразрывности Навье-Стокса. Моделирование тензора напряжений Рейнольдса может быть реализовано через простую алгебраическую модель или более сложные модели с одним и двумя дифференциальными уравнениями  $k-\omega$ ,  $k-\epsilon$  (уравнения для турбулентной энергии  $k$ , удельной скорости диссипации энергии  $\omega$  и скорости диссипации турбулентной энергии  $\epsilon$ ) [25, 35-37].

Модели с двумя дифференциальными уравнениями являются более универсальными моделями и, как правило, используются в инженерных расчетах. Наиболее часто используемой моделью является стандартная  $k-\epsilon$  модели отличающаяся простотой, хорошей сходимостью и неплохой точностью. Недостатки стандартной  $k-\epsilon$  модели: модель плохо подходит для расчета течений при сильной кривизне потока, течений с отрывом, пристеночных течений [25, 35]. В рамках моделирования будет использоваться стандартная  $k-\epsilon$  модель.

В модели горения предполагается, что протекает одностадийная необратимая брутто-реакция [38]. Использование многостадийных реакций может повысить точность расчета, однако приводит к увеличению вычислительных затрат.

К основным моделям для расчета скорости брутто-реакции относятся кинетическая, модель вихревой диссипации (EDM), модель, основанная на концепции вихревой вязкости (EDC) [38].

В кинетической модели горения пренебрегается турбулентными флуктуациями и используется уравнение Аррениуса, наиболее подходящее для расчета ламинарного горения. Модель является неточной при расчете турбулентного горения и применяется для расчета горения с небольшими турбулентными флуктуациями [31].

Модель EDM (Eddy Dissipation Model) [39] основана на предположении о вихревой диссипации и определяет связь между скоростью реакции и скоростью диссипации вихрей реагентов и продуктов горения. Модель EDM разработана, главным образом, для расчета турбулентного горения и широко используется в настоящее время.

Усовершенствованным по сравнению с EDM является подход, базирующийся на концепции вихревой вязкости EDC (Eddy Dissipation Concept) [40]. Реакция горения протекает в узких ламинарных зонах между турбулентными вих-

рями. При использовании в модели концепции вихревой вязкости, возможно, интегрировать детальную химию (набор элементарных реакций), для описания процессов горения, что повышает точность химической составляющей, но увеличивает время вычислений.

Модели EDM и EDC применяются для моделирования горения предварительно перемешанных и неперемешанных смесей [39, 40].

Для моделирования нестационарного горения предполагается использовать модель EDM, поскольку скорость нестационарного горения в условиях угольной шахты определяется главным образом турбулентной теплопроводностью и диффузией.

При расчетах турбулентных течений с горением, необходимо учитывать энергию излучения, которая может иметь значительную долю от общего потока энергии [25]. Также необходимы данные об излучении, которые являются исходными для дальнейшего проектирования оптоэлектронной системы контроля нестационарного горения.

Численное моделирование излучения основано на решении транспортного уравнения для переноса теплового излучения [25].

Основными моделями, которые используются для расчета переноса энергии излучением, являются: модель Росселанда [41], диффузионная модель P-1 [42], модель дискретного переноса (DTRM), модель дискретных ординат (DO).

Выбор модели излучения выполняется с учетом оптической толщины:  $kL$ , где  $k$  – коэффициент поглощения излучения продуктами горения,  $1/m$ ,  $L$  – характерный размер слоя,  $m$ . Для  $kL \gg 1$  более точными являются модель Росселанда и P-1. Причем P-1 используется для  $kL > 1$ , модель Росселанда при  $kL > 3$ . Модели DTRM и DO применяются для широкого диапазона оптических толщин, но имеют высокие требования к вычислительным ресурсам [36].

Для нагретых продуктов горения метано-воздушной смеси коэффициент поглощения лежит в диапазоне от 0,1 до 0,4  $m^{-1}$  [43]. Характерный размер слоя находится в диапазоне от 1 до 20  $m$ . Таким образом, оптическая толщина составляет от 0,1 до 8  $m$ .

С учетом значений оптических толщин и для снижения вычислительных затрат для моделирования излучения выбрана модель P-1.

Исходными данными для моделей переноса излучения являются данные о коэффициенте поглощения нагретых продуктов горения [36].

Расчет коэффициента поглощения выполняется с использованием следующих моделей

[43]:

- модель полинейного счета (line-by-line model) (спектральные коэффициенты поглощения);

- статистические узкополосная, широкополосная модели (коэффициенты поглощения для спектральных полос);

- «глобальные» модели (интегральные по спектру коэффициенты поглощения), к которым относятся приближение «серого» газа и модель взвешенной суммы серых газов (Weighted-Sum-of-Gray-Gases Model (WSGGM)).

Модель полинейного счета основана на использовании спектральных коэффициентов поглощения с высоким разрешением по длине волны на основе баз данных HITRAN, HITEMP, что обуславливает ее высокую точность. В тоже время, модель является вычислительно затратной и требует усилий по поддержанию базы данных со спектрами поглощения газов [43].

При выполнении численного моделирования излучения используются упрощенные модели (статистические, «глобальные») для расчета коэффициента поглощения, определенные путем аппроксимации данных, полученных теоретическим или эмпирическим путем. При этом коэффициент поглощения излучения зависит от состава газа, температуры, давления и характерной длины поглощающего слоя [43].

Статистические узкополосная, широкополосная модели позволяют рассчитать приближенный спектральный коэффициент поглощения. В узкополосных и широкополосных моделях спектр делится на различное число спектральных полос, каждой из которых соответствует определенное значение коэффициента поглощения [43].

«Глобальные» модели позволяют рассчитывать интегральные коэффициенты поглощения по всему спектру. «Глобальные» модели являются менее вычислительно затратными по сравнению со статистическими узкополосными и широкополосными моделями.

Среди «глобальных» моделей приближение «серого» газа является самым упрощенным и наименее точным и использует планковские средние коэффициенты поглощения, полученные экспериментальным путем или теоретически на основе базы данных HITEMP со спектрами поглощения высокого разрешения.

Модель взвешенной суммы серых газов (WSGGM) является промежуточной между упрощенной моделью серого газа и точными спектральными моделями.

Модель находит широкое применение в

различных методах решения уравнения переноса излучения [44].

Для расчета коэффициента поглощения была выбрана модель взвешенной суммы серых газов (WSGGM).

В модели WSGGM выполняется аппроксимация коэффициента излучения продуктов горения суммой коэффициентов излучения набора серых газов, каждому из которых соответствует коэффициент поглощения, при суммировании также учитываются весовые коэффициенты, зависящие от температуры продуктов горения. При выполнении моделирования предполагается использовать аппроксимацию для продуктов горения ( $CO_2$ ,  $H_2O$ ) стехиометрической метано-воздушной смеси. Коэффициенты для аппроксимации приведены в работе [45].

При расчете коэффициента поглощения помимо температуры необходимо учитывать влияние изменения полного давления, которое может быть существенным при нестационарном горении особенно при переходе горения в детонацию. Для учета влияния давления на коэффициент поглощения будут вводиться поправки в виде масштабирующих коэффициентов с учетом данных представленных в работе [46].

Моделирование нестационарного горения с учетом выбранных моделей предлагается выполнять с использованием готовых программных пакетов вычислительной гидродинамики (CFD) [25].

В области численного моделирования турбулентных течений в России нашли широкое распространение такие программные пакеты, как STAR-CD/STARCCM+, Fluent, CFX, FlowVision [47].

STAR-CD/STARCCM+, Fluent, CFX являются профессиональными CFD комплексами для решения значительного спектра задач механики сплошных сред и теплообмена и обладают равными возможностями [47].

Пакет FlowVision, менее универсален, чем вышеупомянутые пакеты, однако существенно проще в освоении и менее требователен к вычислительным ресурсам. В то же время благодаря достаточно большому набору включенных в него моделей охватывает весьма широкий круг приложений [47].

В качестве программного комплекса для моделирования нестационарного горения был выбран пакет FlowVision, позволяющий реализовать все выбранные модели.

#### **Исходные данные для моделирования**

На основе результатов анализа подходов к исследованию и численному моделированию

нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах для проведения моделирования выбраны следующие модели:

- модель турбулентного течения – модель на базе осредненных нестационарных (URANS) уравнений Навье-Стокса;

- модель для турбулентных переменных  $k$  и  $\varepsilon$  – стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель;

- модель горения на базе одностадийной необратимой реакции горения стехиометрической метано-воздушной смеси;

- модель скорости брутто-реакции – модель вихревой диссипации (EDM);

- моделирование излучения – диффузионная модель P-1;

- модель переноса энергии излучением

- модель взвешенной суммы серых газов (WSGGM), коэффициенты для модели из работы [45], масштабирующие коэффициенты для учета влияния давления из работы [46].

К исходным данным для выполнения моделирования, помимо выбранных моделей, относятся геометрические параметры объекта (выработки угольной шахты) и препятствий, граничные условия, температура и расположение воспламенителя, параметры горючей смеси, начальные условия по температуре и давлению.

Геометрические параметры выработки определяются значением площади поперечного сечения, которое изменяется от  $7 \text{ м}^2$  при ширине и высоте около  $2.5 \text{ м}$  до  $30 \text{ м}^2$  при ширине  $6 \text{ м}$  и высоте  $5 \text{ м}$  [48].

Описание воздействия потока вентиляционного воздуха на турбулентное горение является сложным, поскольку при возникновении аварий и загазованностей, как правило, имеют место нарушения работы вентиляции, при этом параметры потока воздуха существенно отклоняются от требуемых для режима работы вентиляции.

Препятствиями в угольных шахтах являются крепь выработок и различное оборудование. Расположение крепи в выработках имеет регулярную структуру и строго регламентировано [48], что позволяет исследовать ее влияние на турбулентное горение. Расположение оборудования может изменяться в зависимости от условий протекания производственного процесса [48] и его сложно учитывать в качестве влияющего фактора на возникновение турбулентного горения.

Таким образом, в рамках выполнения исследования будет рассматриваться влияние на турбулизацию горения препятствий в виде крепи выработок угольных шахт. Это позволит ограни-

чить широкий спектр геометрий препятствий и провести систематическое исследование за счет регулярной структуры и геометрии крепи. К тому же крепь присутствует в шахте повсеместно и чаще всего будет оказывать влияния на турбулизацию пламени.

В горизонтальных и наклонных выработках, наиболее распространены металлические крепи (более  $50 \%$ ). Металлическая жесткая рамная крепь имеет арочную, трапециевидную (прямоугольную) и кольцевую форму. Для крепи используют двутавровые балки (высота  $0,14$ – $0,2 \text{ м}$ ), рельсы (высотой  $0,1$ – $0,14 \text{ м}$ ) и специальный взаимозаменяемый профиль (высотой  $0,088$ – $0,137$ ). Расстояние между арками принимают равным от  $0,5$  до  $1,25 \text{ м}$  [48].

С учетом геометрических параметров крепи выработок и характерного для угольных шахт диаметра выработки  $D=3 \text{ м}$  (пересчитанному через площадь ее сечения), параметры перегородок находятся в диапазоне  $S \text{ (м)}$  от  $0,15D$  до  $0,4D$  и  $BR$  от  $0,05$  до  $0,15$ .

При моделировании будут использоваться следующие граничные условия – труба диаметром  $3 \text{ м}$  с одним закрытым и одним открытым концом и кольцевыми перегородками с параметрами  $S=0,15$ – $0,4$ ;  $BR=0,05$ – $0,15$ . Воспламенитель располагается у закрытого конца трубы. Температура воспламенения устанавливается равной  $650 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Массовый стехиометрический коэффициент (метан-воздух) принимается равным  $17,24$ .

Начальные условия – температура смеси  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление  $105 \text{ Па}$ .

Этапами выполнения моделирования являются:

- проверка адекватности компьютерного моделирования на экспериментальных данных, приведенных в работах [31, 32]. Предполагается проверка соответствия температуры горения при дефлаграции и переходе горения в детонацию, скорости распространения фронта пламени, давления, интегрального энергетического излучения продуктов горения экспериментальным данным;

- оценка масштабируемости результатов моделирования на трубы с диаметрами, сопоставимыми с шириной выработки шахт, с учетом экспериментальных данных приведенных в литературе;

- моделирование нестационарного горения для условий угольной шахты – определение скорости горения, температуры, давления, интегральной энергетической излучения продуктов горения.

### Заключение

В результате выполнена постановка задачи моделирования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах.

Решены следующие задачи:

– рассмотрены механизмы ускорения пламени и перехода горения в детонацию в условиях угольной шахты;

– проанализированы подходы к исследованию ускорения пламени и перехода горения в детонацию;

– проанализированы подходы к моделированию турбулентных течений при нестационарном горении;

– сформулированы исходные данные для моделирования.

Исследование предполагается выполнять на базе численного моделирования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах с использованием следующих моделей:

– модель на базе осредненных нестационарных (URANS) уравнений Навье-Стокса;

– стандартная  $k-\varepsilon$  модель турбулентности;

– модель горения на базе одностадийной необратимой реакции горения стехиометрической метано-воздушной смеси;

– модель скорости брутто-реакции – модель вихревой диссипации (EDM);

– моделирование излучения – диффузионная модель P-1;

– модель переноса энергии излучением – модель взвешенной суммы серых газов (WSGGM).

В качестве программного комплекса для численного моделирования нестационарного горения был выбран пакет FlowVision.

Моделирование предполагается выполнять для трубы с одним закрытым и одним открытым концом и препятствиями внутри трубы, при этом поджиг располагать у закрытого конца. Препятствиями, турбулизирующими горение, являются кольцевые перегородки с геометрическими параметрами, соответствующими размерам крепи в угольных шахтах.

Моделирование позволит получить характеристики процесса распространения фронта пламени с учетом перехода горения в детонацию для условий угольных шахт и параметры оптического излучения пламени, возникающего при нестационарном горении метано-воздушных смесей.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00844.**

**The project is fulfilled with financial support of RFFI within the frames of a scientific project No. 17-08-00844**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевцов Н. Р. Взрывозащита горных выработок. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. Донецк: ДонНТУ, 2002. 280 с.
2. Айруни А. Т., Клебанов Ф. С., Смирнов О. В. Взрывоопасность угольных шахт. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. 264 с.
3. Оценки условий возбуждения и гашения взрывных волн при шахтных взрывах / А. А. Васильев [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 2. С.91–105.
4. Pavlov A. N., Sypin E. V. Optoelectronic system for determination of ignition center three-dimensional coordinates at initial stage // 9th International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010: Conference proceedings. Novosibirsk: NSTU, 2010, P. 417–419.
5. Пирометрический датчик с оптическими затворами для определения двумерных координат очага взрыва / А. И. Сидоренко [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2013. № 1.1. С. 98–104.
6. Лисаков С. А., Кураев А. В., Павлов А. Н., Сыпин Е. В. Программно-аппаратный комплекс для управления многоточечной системой определения координат очага возгорания // Ползуновский вестник. 2014. № 2. С. 179–182.
7. Лабораторный образец быстродействующего многопорогового прибора контроля аварийных и предаварийных ситуаций во взрывоопасной атмосфере / Е. С. Повернов [и др.] // Ползуновский вестник. 2013. № 2. С. 172–178.
8. Tupikina N.Y., Sypin E.V., Lisakov S.A., Pavlov A.N., Leonov G.V. Development of the Testing Technique of Main Parameters for Two Spectral Ratios Optical-Electronic Device // 16th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2015: Conference proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2015. P. 325–329.
9. Васильев А. А., Васильев В. А. Расчетные и экспериментальные параметры горения и детонации смесей на основе метана и угольной пыли // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. №2. С.8-39.
10. Компьютерное моделирование горения метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С. А. Лисаков [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 3. С. 37–46.
11. Компьютерное моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития / С.А. Лисаков [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный

- анализ и информационные технологии. 2016. № 3. С. 32–41.
12. Детонация реакционноспособных газовых смесей как задача об очаговом тепловом взрыве / О. Б. Кудряшова [и др.] // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 2. С. 53–58.
  13. Авдеев С. В., Свинцов А. А., Свинцов А. Г. Распределенная многоточечная оптоволоконная система обнаружения пожара в туннелях // ФОТОН-ЭКСПРЕСС. № 6 (46). 2005. С. 177–180.
  14. Дийков Л.К., Медведев Ф.К., Шелехин Ю.Л. Электронно-оптические извещатели пламени // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2000. №6. С. 26–29.
  15. Системы взрывозащиты газоотводящей сети высокой пропускной способности / В. Г. Казанцев [и др.] // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2009. № 12. С. 380–396.
  16. Сыпин Е. В. Оптико-электронный прибор обнаружения начальной стадии развития взрыва в газодисперсных системах: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13: защищена 28.05.2007; утв. 14.12.2007 / Сыпин Евгений Викторович. Бийск, 2007. 144 с.
  17. Павлов А. Н. Оптико-электронная система определения трехмерных координат очага взрыва в газодисперсных системах на начальной стадии: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13: защищена 29.06.10; утв. 19.11.10 / Павлов Андрей Николаевич. Бийск, 2010. 134 с.
  18. Сидоренко А. И. Оптико-электронное устройство для обнаружения очагов возгорания и определения их двумерных координат: дис. ... канд. техн. наук: 05.11.13 / Сидоренко Антон Игоревич; [Место защиты: Нац. исслед. Том. политехн. ун-т]. Бийск, 2015. 154 с. : ил.
  19. Джигрин А. В. Анализ действующих в угольных шахтах систем локализации взрывов и оценка эффективности их применения. Режим доступа: [http://asvplv.ru/doc/expert\\_mvк.pdf](http://asvplv.ru/doc/expert_mvк.pdf).
  20. S.K. Kundu, J. Zanganeh, D. Eschebacha, N. Mahinpeyb, B. Moghtaderia. Priority Explosion characteristics of methane–air mixtures in a spherical vessel connected with a duct, *Process Safety and Environmental Protection*, Volume 111, 2017, Pages 85-93.
  21. Зельдович Я. Б., Баренблатт Г. И., Либрович В. Б., Махвиладзе Г. М. Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
  22. Зельдович Я.Б., Компанеев А.С. Теория детонации. Под ред. Шустова С.Н. М.: Изд-во технико-теоретической литературы, 1955. 268 с.
  23. Семёнов Н. Н. Газовые взрывы и теория цепных реакций (переиздание статьи 1931 года). УФН. 1993. Т. 163. № 4. С. 65–75.
  24. Щелкин К.И., Трошин Я.К. Газодинамика горения. М., 1963. 256 с.
  25. Юн А. А. Моделирование турбулентных течений. Изд. 2-е, доп. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 352 с.
  26. Иванов, Владислав Сергеевич. Математическое моделирование перехода горения в детонацию во взрывчатых газовых смесях : дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.17 / Иванов Владислав Сергеевич; [Место защиты: Ин-т хим. физики им. Н.Н. Семенова РАН]. Москва, 2011. 145 с.
  27. Gamezo, V. N., Ogawa, T., and Oran, E. S., *Flame Acceleration and DDT in Channels with Obstacles: Effect of Obstacle Spacing, Combustion and Flame*, Vol. 155, 2008, pp. 302–315.
  28. Khokhlov, A. M., Oran, E. S., and Thomas, G. O., “Numerical Simulation of Deflagration-to-Detonation Transition: the Role of Shock-Flame Interactions in Turbulent Flames,” *Combust. Flame*, Vol. 117, 1999, pp. 323–339.
  29. Gamezo, V. N., Ogawa, T., and Oran, E. S., “Numerical Simulations of Flame Propagation and DDT in Obstructed Channels,” *Proc. Combust. Inst.*, Vol. 31, 2007, pp. 2463–2471.
  30. E. S. Oran, V. N. Gamezo & R. K. Zipf Jr. Large-Scale Experiments and Absolute Detonability of Methane/Air Mixtures, *Combustion Science and Technology*, 187:1-2, 2015, pp. 324-341.
  31. Kuznetsov, M., Ciccarelli G., Dorofeev S., Alekseev V., Yankin Yu, and Kim T. H. DDT in Methane-Air Mixtures, +Shock Waves, Vol. 12, 2002, pp. 215–220.
  32. V. N. Gamezo, R. K. Zipf, Jr., D. A. Kessler, E. S. Oran. DDT in Natural Gas-Air Mixtures on Large Scales: Experiments and Simulations, 24th ICDERS, 2013, Taipei, Taiwan, pp. 1-6.
  33. Cheng Wang, Xinzhuang Dong, Jun Cao & Jianguo Ning (2015) Experimental Investigation of Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition Characteristics Using Coal Gas and Air Mixture, *Combustion Science and Technology*, 187:11, pp. 1805-1820.
  34. Фролов С. М. Ускорение перехода горения в детонацию в газах: от К. И. Щёлкина до наших дней // *Физика горения и взрыва*. 2012. № 3. С. 13–24.
  35. Бульсова Л.А. Численное моделирование при испытаниях и наладке малоэмиссионных камер сгорания ГТУ: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.14 / Бульсова Людмила Александровна; [Место защиты: ОАО ВТИ]. Москва, 2014. 162 с.
  36. ANSYS Fluent Theory Guide [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ru.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide>.
  37. FlowVision. Версия 3.09.04. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://flowvision.ru>.
  38. Маркова Т.В. Развитие моделей горения в ПК flowvision [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv\\_es12\\_tesis3.pdf](http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es12_tesis3.pdf).
  39. Magnussen B.F., and Hjertager B.H. (1976) «On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion.» Sixteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 719-729.
  40. Magel H.C., Schnell U. and Hein K.R.G. (1996) «Simulation of detailed chemistry in a turbulent combustion flow.» Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute, pp. 67-74.
  41. Rosseland S. *Theoretical Astrophysics*. Oxford University Press. London. 1936.
  42. Четверушкин Б.Н. Математическое моделирование задач динамики излучающего газа. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1985, 304 с.
  43. M.F. Modest, D.C. Haworth. *Radiative Heat Transfer in Turbulent Combustion Systems: Theory and Applications*. Springer, 2016, 151 p.
  44. T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman. «Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model». *J. Heat Transfer*. 104. 602–608. 1982.

45. L.J. Dorigon, M. Galarça, F.H. França. New coefficients of the weighted-sum-of-gray-gases model using Hitemp 2010 database. 4th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2012, Rio de Janeiro, RJ.
46. D. K. Edwards and R. Matavosian. «Scaling Rules for Total Absorptivity and Emissivity of Gases». J. Heat Transfer. 106. 684–689. 1984.
47. Мурашов А. Пакеты инженерного анализа для вычислительной гидродинамики // Суперкомпьютеры. № 2(2). 2010. С. 52–57.
48. Васючков Ю. Ф. Горное дело: Учеб. для техникумов. М.: Недра, 1990. 512 с.
49. E.S. Oran, V.N. Gamezo, and D.A. Kessler Deflagrations, Detonations, and the Deflagration-to-Detonation Transition in Methane-Air Mixtures, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 2011, 125 p.

## REFERENCES

1. Shevtsov, N.R. (2002). *Vzryvozashchita gornyykh vyrabotok [Mine opening explosion protection]*. Donetsk: DonNTU [in Russian].
2. Airuni, A.T., Klebanov, F.S., & Smirnov, O.V. (2011). *Vzryvoopasnost ugolnykh shakht [Explosion danger of coal mines]*. Moscow: Gornoie delo [in Russian].
3. Vasiliev, A.A., Pinaev, A.V., Fomin, P.A., Trotsiuk, A.V., Vasiliev, V.A., Trubitsyn, A.A., Trubitsyna, D.A. (2016). Otsenki uslovii vozbuzhdeniia i gasheniia vzryvnykh voln pri shakhtnykh vzryvakh [Estimates of blast waves initiation and stopping conditions during mine explosions]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 2, 91-105 [in Russian].
4. Pavlov A. N., Sypin E. V. (2010). Optoelectronic system for determination of ignition center three-dimensional coordinates at initial stage // *9th International conference and seminar on micro/nanotechnologies and electron devices EDM'2010: Conference proceedings*. Novosibirsk: NSTU, P. 417–419 [in English].
5. Sidorenko, A.I., Pavlov, A.N., Sypin, Ye.V., & Kuliavtsev, Ye.Ya. (2013). Pirometricheskii datchik s opticheskimi zatvorami dlia opredeleniia dvukhmernykh koordinat ochaga vzryva [Pyrometric sensor with optical shutters to determine the explosion source two-dimensional coordinates]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 1.1, 98-104 [in Russian].
6. Lisakov, S.A., Kuraev, A.V., Pavlov, A.N., & Sypin, Ye.V. (2014). Programmno-apparatnyi kompleks dlia upravleniia mnogo-tochechnoi sistemoi opredeleniia koordinat ochaga vozgoraniia [Software and hardware complex for controlling a multi-point system for determining the ignition source coordinates]. *Polzunovski vestnik – Polzunov Herald*, 2, 179-182 [in Russian].
7. Povernov, Ye.S., Gerasimov, D.A., Sypin, Ye.V., Tupikina, N.Yu., & Pavlov, A.N. (2013). Laboratornyi obrazets bystrodeistvuiushchego mnogoporogovogo pribora kontrolya avariinykh i predavariinykh situatsii vo vzryvoopasnoi atmosfere [Laboratory sample of a high-speed multi-threshold device for monitoring emergency and pre-emergency situations in explosive atmosphere]. *Polzunovski vestnik – Polzunov Herald*, 2, 172-178 [in Russian].
8. Tupikina, N.Y., Sypin, E.V., Lisakov, S.A., Pavlov, A.N., & Leonov, G.V. (2015). Development of the Testing Technique of Main Parameters for Two Spectral Ratios Optical-Electronic Device // *16th International conference of young specialists on micro/nanotechnologies and electron devices EDM 2015: Conference proceedings*. – Novosibirsk: NSTU, P. 325–329 [in English].
9. Vasiliev, A.A., & Vasiliev, V.A. (2016). Raschetnyie i eksperimentalnye parametry gorenii i detonatsii smesei na osnove metana i ugolnoi pyli [Calculated and experimental parameters of combustion and detonation of mixtures based on methane and coal dust]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 2, 8-39 [in Russian].
10. Lisakov, S.A., Sidorenko, A.I., Pavlov, A.N., Sypin, Ye.V. & Leonov, G.V. (2016). Kompiuternoe modelirovanie gorenii metano-vozdushnykh smesei na nachalnoi stadii razvitiia [Computer modeling of methane-air mixtures combustion at the initial stage of development]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 3, 37-46 [in Russian].
11. Lisakov, S.A., Sidorenko, A.I., Sypin, Ye.V., Pavlov, A.N., & Leonov, G.V. (2016). Kompiuternoe modelirovanie izlucheniia plameni pri gorenii metano-vozdushnykh smesei na nachalnoi stadii razvitiia [Computer modeling of flame propagation during methane-air mixtures combustion at the initial stage of development]. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta – Herald of Voronezh State University*, 3, 32-41 [in Russian].
12. Kudriashova, O.B., Galenko, Yu.A., Sypin, Ye.V., Tupikina, N.Yu., & Lisakov, S.A. (2017). Detonatsiia reaktsionnosposobnykh gazovykh smesei kak zadacha ob ochagovom teplovom vzryve [Detonation of reactive gas mixtures as a problem of local thermal explosion]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 2, 53-58 [in Russian].
13. Avdeev, S.V., Svintsov, A.A., & Svintsov, A.G. (2005). Raspredelennaia mnogo-tochechnaia optovokonnaia sistema obnaruzheniia pozhara v tunneliakh [Distributed multipoint fiber-optic fire detection system in tunnels]. *FOTON-EKSPRESS*, 6 (46), 177-180 [in Russian].
14. Diikov, L.K., Medvedev, F.K., & Shelekhin, Yu.L. (2000). Elektronno-opticheskie izveshchateli plameni [Electron-optical flame detectors]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologia, Biznes – Electronics: Science, Technology, Business*, 6, 26-29 [in Russian].
15. Kazantsev, V.G., Zolotykh, S.S., Durnin, M.K., Tormozov, V.V., Kuimov, R.I., & Kuliavtsev, Ye.Ya. (2009). Sistemy vzryvozashchity gazootvodiashchei seti vysokoi propusknoi sposobnosti [Explosion protection systems for a high-output gas pumping network]. *Gorny informatsionno-analiticheskii biulleten – Mining Informational Analytical Bulletin*, 12, 380-396 [in Russian].
16. Sypin, Ye.V. (2007). Optiko-ehlektronnyi pribor obnaruzheniia nachalnoi stadii razvitiia vzryva v gazodispersnykh sistemakh [Optoelectronic device for the explosion initial stage detecting in gas-dispersed systems]. Candidate's thesis, Biisk [in Russian].
17. Pavlov, A.N. (2010). Optiko-ehlektronnaia sistema opredeleniia trekhmernykh koordinat ochaga vzryva v gazodispersnykh sistemakh na nachalnoi stadii [Optoelectronic system for determining the three-dimensional coordinates of the explosion source in gas-dispersed systems at the initial stage]. *Candidate's thesis*, Biisk [in Russian].

18. Sidorenko, A.I. (2015). Optiko-ehlektronnoie ustroistvo dlia obnaruzheniia ochagov vozgoraniia i opredeleniia ikh dvumernykh koordinat [Optoelectronic device for detection of ignition sources and determination of their two-dimensional coordinates]. *Candidate's thesis*, Biisk [in Russian].
19. Dzhigrin, A.V. *Analiz deistvuiushchikh v ugolnykh shakhtakh sistem lokalizatsii vzryvov i otsenka ehffektivnosti ikh primeneniia* [Analysis of explosion localization systems in coal mines and evaluation of their effectiveness]. Retrieved from: [expert\\_mvk.pdf](#) [in Russian].
20. Kundu, S.K., Zanganeh, J., Eschebacha D., Mahinpeyb, N., & Moghtaderia B. Priority Explosion characteristics of methane–air mixtures in a spherical vessel connected with a duct. *Process Safety and Environmental Protection, Volume 111*, 2017, Pages 85-93 [in English].
21. Zeldovich, Ya.B., Barenblatt, G.I., Librovich, V.B., & Makhviladze, G.M. (1980). *Matematicheskaiia teoriia gorenii i vzryva* [Mathematical theory of combustion and explosion]. Moscow: Nauka [in Russian].
22. Zeldovich, Ya.B., & Kompaneets, A.S. (1955). *Teoria detonatsii* [Detonation theory]. Moscow: Izdatelstvo tekhniko-teoreticheskoi literatury [in Russian].
23. Semenov, N.N. (1993). *Gazovyye vzryvy i teoriia tsepnykh reaktsyi* [Gas explosions and chain reaction theory]. UFN, 4, 65-75 [in Russian].
24. Shchelkin, K.I., & Troshin, Ya.K. (1963). *Gazodinamika gorenii* [Combustion gas-dynamics]. Moscow [in Russian].
25. Yun, A.A. (2010). *Modelirovaniie turbulentnykh techenii* [Modeling of turbulent flows]. Moscow: Knizhny dom "LIBROKOM" [in Russian].
26. Ivanov, V.S. (2011). *Matematicheskoe modelirovaniie perekhoda gorenii v detonatsiiu vo vzryvchatykh gazovykh smesiakh* [Mathematical modeling of combustion to detonation transition in explosive gas mixtures]. *Candidate's thesis*, Moscow [in Russian].
27. Gamezo, V. N., Ogawa, T., & Oran, E. S., (2008). Flame Acceleration and DDT in Channels with Obstacles: Effect of Obstacle Spacing, *Combustion and Flame, Vol. 155*, pp. 302–315 [in English].
28. Khokhlov, A. M., Oran, E. S., & Thomas, G. O. (1999). Numerical Simulation of Deflagration-to-Detonation Transition: the Role of Shock-Flame Interactions in Turbulent Flames, *Combust. Flame, Vol. 117*, pp. 323–339 [in English].
29. Gamezo, V. N., Ogawa, T., & Oran, E. S. (2007). Numerical Simulations of Flame Propagation and DDT in Obstructed Channels, *Proc. Combust. Inst., Vol. 31*, pp. 2463–2471 [in English].
30. Oran, E. S., Gamezo V. N., & Zipf Jr., R. K. (2015). Large-Scale Experiments and Absolute Detonability of Methane/ Air Mixtures, *Combustion Science and Technology, 187:1-2*, pp. 324-341 [in English].
31. Kuznetsov, M., Ciccarella G., Dorofeev S., Alekseev V., Yankin Yu, & Kim T. H. (2002). DDT in Methane-Air Mixtures, +Shock Waves, *Vol. 12*, pp. 215–220 [in English].
32. Gamezo, V. N., Zipf Jr., R. K., Kessler, D. A., & Oran, E. S. (2013) DDT in Natural Gas-Air Mixtures on Large Scales: Experiments and Simulations, *24th ICDERS, Taipei, Taiwan*, pp. 1-6 [in English].
33. Cheng Wang, Xinzhuang Dong, Jun Cao & Jianguo Ning (2015) Experimental Investigation of Flame Acceleration and Deflagration-to-Detonation Transition Characteristics Using Coal Gas and Air Mixture, *Combustion Science and Technology, 187:11*, pp. 1805-1820 [in English].
34. Frolov, S.M. (2012). Uskoreniie perekhoda gorenii v detonatsiiu v gazakh: ot K.I. Shchelkina do nashikh dnei [Acceleration of combustion to detonation transition in gases: from K.I. Shchelkin to our days. *Fizika gorenii i vzryva – Physics of combustion and detonation, 3*, 13-24 [in Russian].
35. Bulysova, L.A. (2014). Chislennoie modelirovaniie pri ispytaniakh i naladke maloemissionnykh kamer sgoraniia GTU [Numerical modeling during testing and adjustment of low-emission combustion chambers]. *Candidate's thesis*. Moscow [in Russian].
36. ANSYS Fluent Theory Guide. Retrieved from: <https://ru.scribd.com/doc/140163341/Ansys-Fluent-14-0-Theory-Guide> [in English].
37. FlowVision. Version 3.09.04. Rukovodstvo pilzovatelii [User's manual]. Retrieved from: <https://flowvision.ru> [in Russian].
38. Markova, T.V. Razvitiie modelei gorenii v PK flowvision [Combustion model development in flowvision software]. Retrieved from: [http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv\\_es12\\_tesis3.pdf](http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es12_tesis3.pdf) [in Russian].
39. Magnussen, B.F., & Hjertager, B.H. (1976) On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, pp. 719-729 [in English].
40. Magel, H.C., Schnell, U. & Hein, K.R.G. (1996) Simulation of detailed chemistry in a turbulent combustion flow, *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion / The Combustion Institute*, pp. 67-74 [in English].
41. Rosseland, S. (1936). *Theoretical Astrophysics*. Oxford University Press. London [in English].
42. Chetverushkin, B.N. (1985). *Matematicheskoiie modelirovaniie zadach dinamiki izluchaiushchego gaza* [Mathematical modeling of radiating gas dynamics tasks]. Moscow: Nauka [in Russian].
43. Modest, M.F., & Haworth, D.C. (2016). Radiative Heat Transfer in Turbulent Combustion Systems: Theory and Applications. *Springer*, 151 p.[in English].
44. Smith, T. F., Shen, Z. F., & Friedman, J. N. Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model. *J. Heat Transfer. 104*. 602–608. [in English].
45. Dorigon, L.J., Galarça, M., & França, F.H. (2012). New coefficients of the weighted-sum-of-gray-gases model using Hitemp 2010 database. *4th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*, Rio de Janeiro, RJ.[in English].
46. Edwards, D. K., & Matavosian, R. (1984) Scaling Rules for Total Absorptivity and Emissivity of Gases. *J. Heat Transfer. 106*. 684–689 [in English].
47. Murashov, A. (2010). Pakety inzhenernogo analiza dlia vychislitelnoi gidrodinamiki [Packages of engineering analysis for computational fluid dynamics]. *Superkompiutorny – Supercomputers, 2*, 52-57.
48. Vasiuchkov, Yu.F. (1990). Gornoie delo [Mining]. Moscow: Nedra [in Russian].
49. Oran, E.S., Gamezo, V.N., & Kessler, D.A. (2011). *Deflagrations, Detonations, and the Deflagration-to-Detonation Transition in Methane-Air Mixtures*, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 125 p. [in English].





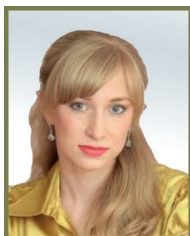
**Д. Е. Скударнов // D. Ye. Skudarnov**  
promlad@inbox.ru

аспирант ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева», Россия, 650000 г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
post graduate of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), 28, Vesenniyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia



**В. А. Портола // V.A. Portola**  
portola2@yandex.ru

д-р техн. наук, профессор, профессор ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева», Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
doctor of technical sciences, professor, professor of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), 28, Vesenniyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia



**А. А. Квасова // A. A. Kvasova**  
kvasovaaa@kuzstu.ru

аспирант ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева», Россия, 650000 г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
post graduate of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), 28, Vesenniyaya Street, Kemerovo, 650000, Russia



**А. В. Сачков // A. V. Sachkov**  
antvals1981@gmail.com

начальник проектного отдела АО «НИИГД», Россия, 650002, г. Кемерово, пр-т Шахтеров, 14  
department head of AO "NIIGD", 14, Shakhvetov Avenue, Kemerovo, 650002, Russia

УДК 622.861

## АНАЛИЗ СМЕРТЕЛЬНОГО ТРАВМАТИЗМА ПРИ ДОБЫЧЕ УГЛЯ ОТКРЫТЫМИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ ANALYSIS OF FATAL TRAUMATISM IN OPENCAST COAL MINING OPERATIONS

*Произведен анализ смертельного травматизма рабочих при добыче угля открытыми горными работами с 2004 г по 2016 г. Несчастные случаи со смертельным исходом объединены в группы. По сформированным группам произведен анализ причин возникновения смертельного травматизма. Установлено, что в последние годы отмечается снижение смертельного травматизма при ведении открытых горных работ. Основной причиной повышения безопасности работ является усиление контроля за состоянием промышленной безопасности на опасных производственных объектах со стороны государства. Снижение числа смертельных случаев травматизма происходит также благодаря применению автоматизированных систем управления производством. Принимаемые меры позволяют повысить трудовую дисциплину персонала на угольных карьерах. Наибольшее количество смертельных случаев при ведении горных работ открытым способом происходит от поражения электрическим током (24 %) и при эксплуатации карьерного транспорта (23 %). Главными причинами таких происшествий является неудовлетворительная организация работ, недостатки в обучении, нарушение правил безопасности, низкий уровень трудовой дисциплины.*

*Workers fatal traumatism analysis in open-cast coal mining from 2004 to 2016 is fulfilled. Fatal accidents are grouped together, and the causes of fatal injuries are analyzed in groups. It has been established that in recent years there has been a decrease in fatal injuries in the opencast mining operations. The main reason for improving work safety is the more strict control over the industrial safety situation at hazardous industrial facilities by the state. The reduction in the number of fatal injuries is also due to the use of automated production management systems. The measures taken make it possible to increase the labor discipline of personnel at opencast coal mines. The greatest number of deaths in opencast mining is due to electric shocks (24%) and during transport operations (23%). The main reasons for such incidents are unsatisfactory organization of work, shortcomings in training, violation of safety rules, low level of labor discipline.*

**Ключевые слова:** ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ТРАВМАТИЗМ, ОХРАНА ТРУДА, НЕСЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕ, СМЕРТЕЛЬНЫЙ ТРАВМАТИЗМ, ДОБЫЧА УГЛЯ ОТКРЫТЫМИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ

**Key words:** INDUSTRIAL TRAUMATISM, LABOR PROTECTION, INDUSTRIAL ACCIDENT, FATAL TRAUMATISM, OPENCAST COAL MINING

Ведение работ по добыче полезных ископаемых сопровождается воздействием на людей ряда опасных и вредных факторов, реализация которых приводит к травматизму и заболеваниям работающих [1,2]. Уровень травматизма не только является следствием уровня общего состояния предприятия, но и оказывает также негативное воздействие на работу предприятия. Так, случаи травматизма зачастую приводят к остановке работ, что ведет к снижению производительности труда. Наблюдается также увеличение экономических потерь предприятия из-за затрат на восстановление оборудования, лечение и реабилитацию пострадавших.

Причинами травматизма на горных предприятиях могут являться такие аварии, как: обрушения горных пород, взрывы скоплений горючих газов и угольной пыли, пожары, горные удары, внезапные выбросы, затопление горных выработок. Для снижения уровня аварийности и травматизма проводятся исследования выделения горючих газов из угля и вмещающих пород [3-6], изучаются механизмы взрыва горючих газов и угольной пыли [7,8]. Изучение причин возникновения пожаров на горных предприятиях [9,10] позволяет снизить количество пожаров и опасность воздействия на людей высокой температуры и токсичных газов.

Анализ статистических данных показывает, что в последние годы наблюдается снижение уровня аварийности на горных предприятиях. Основной причиной повышения безопасности работ на горных предприятиях является ликвидация наиболее опасных шахт, работающих в сложных горно-геологических условиях. Суще-

ственное значение в повышении безопасности работ имеет совершенствование законодательной базы, увеличение расходов на промышленную безопасность и охрану труда. Исследованию травматизма на горных предприятиях посвящены работы [11-13].

В последние годы в России наблюдается тенденция увеличения общей добычи угля с изменением соотношения угля, добываемого в шахтах и при ведении открытых горных работ (ОГР). Происходит сокращение количества шахт и повышение количества угольных карьеров. Учитывая всё возрастающую роль ОГР, необходимо оценить состояние травматизма при ведении работ по добыче угля открытым способом. Проведенный анализ позволит разработать мероприятия, снижающие опасность открытых горных работ.

Для проведения анализа несчастных случаев со смертельным исходом проанализированы отчеты Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору. Общее количество несчастных смертельных случаев при добыче угля открытыми горными работами за период с 2004 по 2016 год представлено на рисунке 1.

Анализ данных, приведенных на рис. 1, показывает, что за последнее время наметилась тенденция к снижению числа несчастных случаев со смертельным исходом при ведении открытых горных работ в угольной промышленности. В основном это связано с повышением контроля за состоянием промышленной безопасности на опасных производственных объектах со стороны государства. Одной из причин снижения числа смертельных случаев является также приме-

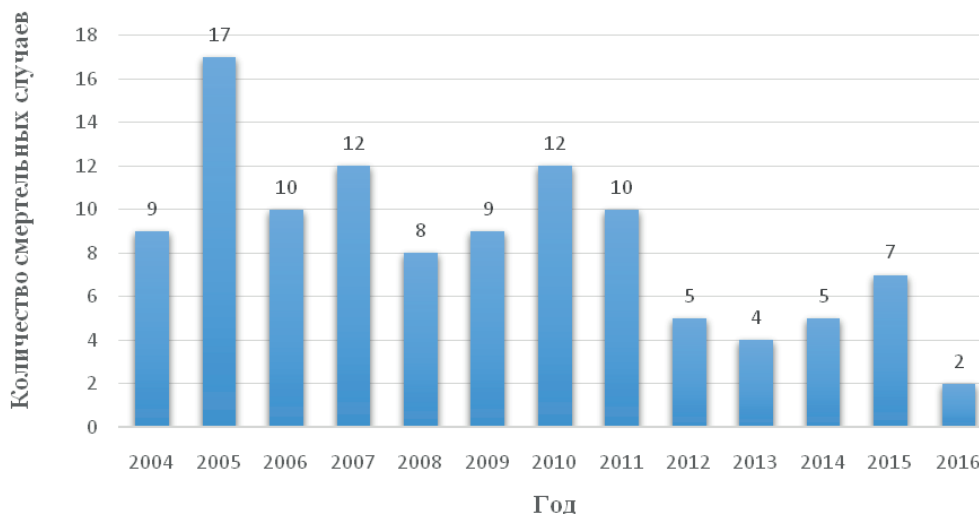


Рисунок 1 – Количество смертельных случаев при добыче угля открытым способом  
 Figure 1 – Number of fatal cases in open cast coal mining

нение автоматизированных систем управления производством. Использование таких систем направлено на повышение трудовой дисциплины персонала. Высокий уровень трудовой дисциплины эквивалентен низкому уровню производственного травматизма.

При проведении детального изучения несчастных случаев со смертельным исходом на угольных карьерах все случаи разбиты по следующим группам:

- происшествия на транспорте;
- происшествия при обслуживании машин и механизмов;
- поражения электрическим током;
- обвалы и обрушения;
- падения с высоты;
- отравления и удушья;

- происшествия при проведении БВР;
- прочие происшествия.

Количество несчастных смертельных случаев по группам при добыче угля открытым способом представлено в таблице 1.

Распределение несчастных случаев со смертельным исходом по группам в процентном соотношении от общего количества несчастных случаев со смертельным исходом для добычи угля открытым горными работами представлено на рисунке 2.

Приведенные на рисунке 2 данные свидетельствуют, что за рассмотренный период времени при добыче угля открытым способом наибольшее количество смертельных травм связано с поражением электрическим током (24%). Основными причинами таких происшествий яв-

Таблица 1. Распределение смертельных несчастных случаев по группам и годам  
Table 1. Distribution of fatal accidents by groups and years

Год	Вид несчастного случая								Всего
	Транспорт	Машины и механизмы	Поражения эл. током	Обвалы, обрушения	Падения с высоты	Взрыв. работы	Отравления	Прочие	
2004	1	2	2	-	1	1	-	2	9
2005	5	4	5	1	-	-	-	2	17
2006	1	-	4	5	-	-	-	-	10
2007	3	2	3	2	2	-	-	-	12
2008	2	1	2	-	1	-	1	1	8
2009	2	2	4	1	-	-	-	-	9
2010	5	2	2	2	-	-	-	1	12
2011	2	2	2	3	1	-	-	-	10
2012	2	2	-	-	-	-	-	1	5
2013	1	1	1	-	1	-	-	-	4
2014	-	1	1	2	1	-	-	-	5
2015	1	1	-	4	1	-	-	-	7
2016	-	-	-	-	1	-	-	1	2



Рисунок 2 – Распределение несчастных смертельных случаев при ведении ОГР в угольной промышленности  
Figure 2 – Fatal injury cases distribution in coal industry open cast mining

ляются неудовлетворительная организация работ с электрооборудованием, недостатки в обучении, нарушение правил безопасности, низкий уровень трудовой дисциплины.

Доля несчастных случаев со смертельным исходом при поражении электрическим током по отношению к общему числу несчастных случаев со смертельным исходом на угольных карьерах отображена на рисунке 3.

Несчастные случаи со смертельным исходом, ставшие результатом происшествий на транспорте, имеют значительную долю от общего количества несчастных случаев со смертельным исходом при добыче угля открытым способом (23%). Основными причинами происшествий на транспорте стали падения автосамосвалов в отвал (в том числе случаи обрушения породы под технологическим транспортом), уход технологического транспорта под откос (дорожные условия, несоблюдение скоростных режимов, отказ

узлов и агрегатов автосамосвалов), буксировка транспортных средств (нахождение персонала в зоне сцепки транспортных средств), столкновение технологического транспорта. Доля происшествий на транспорте по отношению к общему числу происшествий со смертельным исходом при ведении открытых горных работ отображена на рисунке 4.

Несчастные случаи со смертельным исходом при обслуживании машин и механизмов имеют значительный вес в отношении всех типов несчастных случаев со смертельным исходом (18%). В первую очередь это связано сложной конструкцией машин и механизмов, наличием большого количества вращающихся деталей.

Доля происшествий при обслуживании машин и механизмов по отношению к общему числу несчастных случаев со смертельным исходом отображена на рисунке 5.

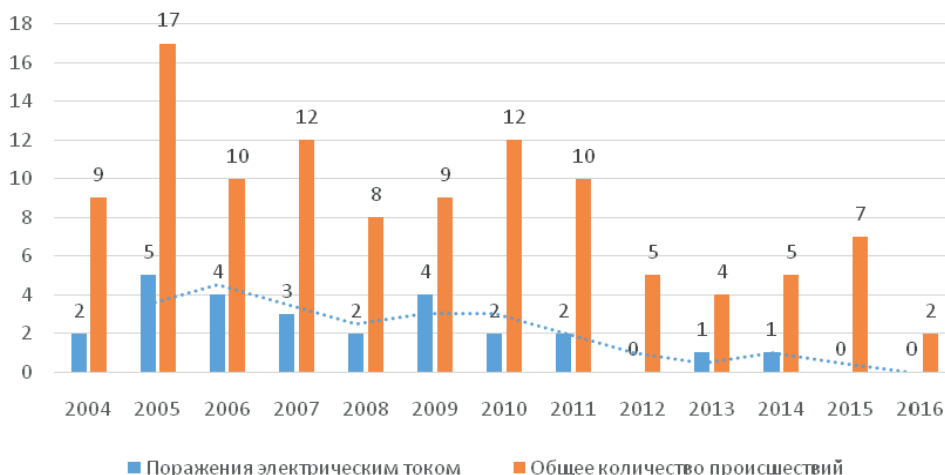


Рисунок 3 – Смертельный травматизм от поражения электрическим током  
Figure 3 – Fatal traumatism caused by electric shock

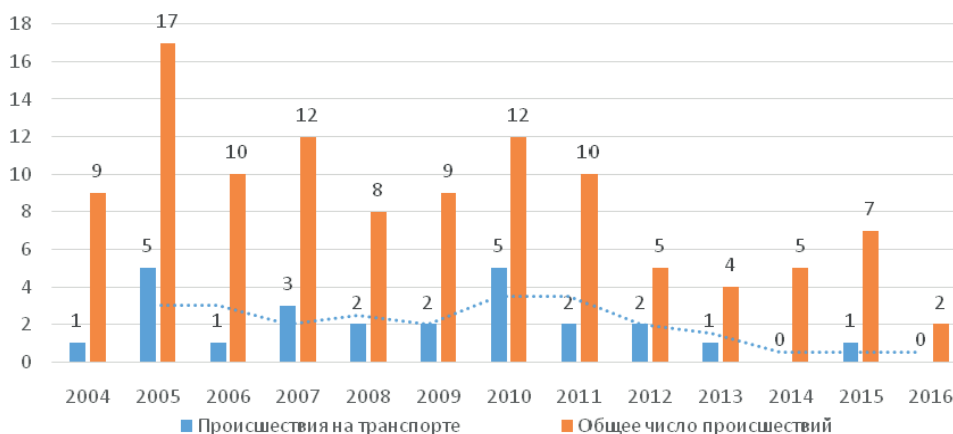


Рисунок 4 – Смертельный травматизм от происшествий на транспорте  
Figure 4 – Fatal traumatism caused by transport accidents

Несчастные случаи со смертельным исходом в результате обвалов и обрушений являются одними из наиболее часто встречающихся несчастных случаев со смертельным исходом (18%). Обвалы и обрушения горной массы возникают из-за нарушения технологического процесса выемки горной массы, отвалообразования, отсутствия постоянного мониторинга движения бортов, отвалов и уступов разрезов.

Результатом подобных происшествий является не только человеческие потери, но и экономический ущерб в результате вывода из строя дорогостоящего оборудования, а также потери от простоев, связанных с остановкой взаимосвязанных технологических процессов.

Доля несчастных случаев со смертельным исходом при обвалах и обрушениях относительно общего числа несчастных случаев со смертельным исходом отображена на рисунке 6.

Основными причинами возникновения несчастных смертельных случаев при ведении открытых горных работ по добыче угля являются:

- нарушения правил безопасности;
- нарушения технологии ведения открытых горных работ;
- отказ оборудования.

Нарушения правил безопасности при ведении открытых горных работ в угольной промышленности могут происходить по следующим причинам:

- недостаточная квалификация персонала (низкий уровень знаний);
- личная неосторожность (неудовлетворительное состояние производственного контроля);
- неудовлетворительное психофизическое состояние;
- нахождение в состоянии алкогольного или наркотического опьянения.



Рисунок 5 – Смертельный травматизм при обслуживании машин и механизмов  
Figure 5 – Fatal traumatism in the process of equipment servicing

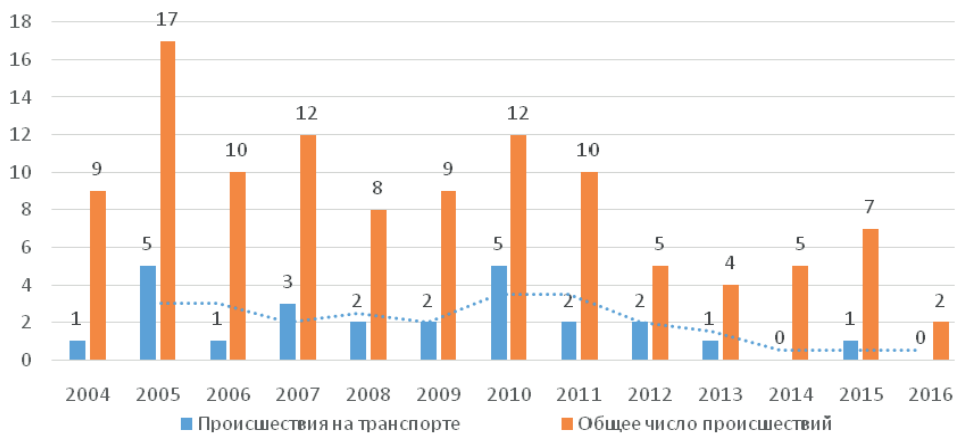


Рисунок 6 – Смертельный травматизм от обвалов и обрушений  
Figure 6 – Fatal traumatism caused by downfalls and cavings

К данным случаям можно отнести нахождение в рабочей зоне движущихся агрегатов, поражения электрическим током в отсутствие целевых работ, связанных с электричеством, допуск к работе в неудовлетворительном психофизическом состоянии.

К нарушениям технологического процесса можно отнести любые нарушения технологии ведения открытых горных работ, которые могут привести к несчастным случаям. Основные нарушения технологии ведения открытых горных работ связаны с невыполнением работ в соответствии с проектом. Так из-за несоблюдения границ места черпания может произойти обрушение породы на карьерный экскаватор.

При проведении ремонтов и обслуживания машин и механизмов несчастные случаи происходят из-за проведения данных видов работ в ненадлежащих условиях, непосредственно в ра-

бочей зоне техники, а также при несоблюдении технологических карт ремонтов и обслуживания. Большинство несчастных случаев со смертельным исходом такого рода возникает при ремонтах и обслуживании экскаваторов.

По проделанному анализу можно сделать следующие выводы.

1. В последние годы наметилась тенденция к снижению количества смертельных случаев при добыче угля открытым способом.

2. Наибольшее количество смертельных случаев случается по основным категориям: транспорт, поражения электрическим током, машины и механизмы, обвалы и обрушения.

3. Основными причинами реализации опасных производственных факторов является нарушение технологического процесса, нарушение правил безопасности, проведение обслуживания машин и механизмов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело. Учебное пособие / К.З. Ушаков, Н.О. Каледина, Б.Ф. Киринов [и др.]. Изд-во Мос. гос. горного универ-та, 2002. 487 с.
2. Портола В.А., Бурков П.В., Гришагин В.М., Фарберов В.Я. Безопасность ведения горных работ и горноспасательное дело. Учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. 201 с.
3. Шинкевич М.В., Е.Н. Козырева Проветривание выемочного участка при интенсивном метановыделении из отработываемого пласта // Вестник КузГТУ. 2017. № 2. С. 51–59.
4. Полевщиков Г.Я., Шинкевич М.В., Плаксин М.С. Газокинетические особенности распада углеметана на конвейерном штреке выемочного участка // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № 8. С. 21-28.
5. Козырева Е.Н., Шинкевич М.В. Особенности газогемеханических процессов на выемочном участке шахты // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2010. № 2. С. 28–35.
6. Шинкевич М.В. Газовыделение из отработываемого пласта с учётом геомеханических процессов во вмещающем массиве // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2013. Отд. вып. № 6. С. 278-285.
7. Портола В.А. Оценка концентрационных пределов взрывчатости угольной пыли // Вестник КузГТУ. 2016. № 5. С. 16–21.
8. Ударные волны при взрывах в угольных шахтах / Д.Ю. Палева [и др.]. М.: Изд-во «Горное дело» ООО «Киммерийский центр», 2011. 312 с. (Библиотека горного инженера. Т. 6 «Промышленная безопасность». Кн. 3).
9. Портола В.А., Храмов В.И. Влияние применяемых в шахтах составов на склонность угля к самовозгоранию // Безопасность труда в промышленности. 2017. № 2. С. 56–59.
10. Портола В.А. Обоснование и разработка способов обнаружения, локализации и контроля за ходом тушения очагов самовозгорания угля в шахтах: дис. ... д-ра техн. наук. Кемерово, 2002. 317 с.
11. Могилат В.Л. Основные причины возникновения и развития опасных производственных ситуаций на горнодобывающих предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 1. С. 70-72.
12. Яковлев В.Л., Могилат В.Л., Тарасов П.И. Причины аварийности на технологическом автотранспорте карьеров и пути ее снижения // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2009. № 1. С. 211-217.
13. Гусев А.И. Снижение травматизма и аварийности на горнодобывающих предприятиях на основе интеграции системы управления промышленной безопасностью // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 12. С. 51-55.

### REFERENCES

1. Ushakov, K.Z., Kaledina, N.O., Kirin, B.F. et al. (2002). *Bezopasnost vedenia gornyykh rabot i gornospasatelnoie delo [Safety in mining and mine rescue work]*. Moscow: Moscow State Mining University [in Russian]
2. Portola, V.A., Burkov, P.V., Grishagin, V.M., & Farberov, V.Ya. (2008). *Bezopasnost vedenia gornyykh rabot i gornospasatelnoie delo [Safety in mining and mine rescue work]*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University [in Russian].
3. Shinkevich, M.V., Kozyreva, Ye.N. (2017). Provetrivanie vyemochnogo uchastka pri intensivnom metanovydelenii iz otrabatyvaemogo plasta [Coal extraction section ventilation with high methane emission from the seam under work]. *Vestnik KuzGTU – KuzGTU Herald*, 2, 51-59 [in Russian].
4. Polevshchikov, G.Ya., Shinkevich, M.V., & Plaksin, M.S. (2011). Gazokineticheskie osobennosti raspada uglemetana na konveyernom shreke vyemochnogo uchastka [Gas-kinetic features of carbon methane decomposition in the extraction section conveyor drift]. *Gorny informatsionno-analiticheskii biulleten – Mining Informational Analytical Bulletin*, 8, 21-28 [in Russian].
5. Kozyreva, Ye.N., & Shinkevich, M.V. (2010). Osobennosti gazogeomekhanicheskikh protsessov na vyemochnom uchastke Shakhty [Features of gas geomechanical processes at the mine extraction section]. *Vestnik nauchnogo*

- tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center, 2, 28-35 [in Russian].*
6. Shinkevich, M.V. (2013). . Gazovydeleniie iz otrabatyvaiemogo plasta s uchiotom geomeomekhanicheskikh protsessov vo vmeshchaiushchem massive [Gas emission from the seam under work with consideration of the geomeomechanical processes in the bedding massif]. *Gorny informatsionno-analiticheskii biulleten – Mining Informational Analytical Bulletin, 6, 278-285 [in Russian].*
  7. Portola, V.A. (2016). Otsenka kontsentratsionnykh predelov vzryvchatosti ugolnoi pyli [Coal dust explosiveness concentration limits assessment]. *Vestnik KuzGTU – KuzGTU Herald, 5, 16-21 [in Russian].*
  8. Paleev, D.Yu. et al. (2011). *Udarnye volny pri vzryvakh v ugolnykh shakhtakh [Shock waves at explosions in coal mines]. Moscow: Gornoie delo [in Russian].*
  9. Portola, V.A., & Khramtsov, V.I. (2017). Vliianie primeniyaemykh v shakhtakh sostavov na sklonnost uгля k samovozgoraniiu [Influence of the compositions used in mines on the propensity of coal to spontaneous combustion] *Bezopasnost truda v promyshlennosti – Industrial Labor Safety, 2, 56-59 [in Russian].*
  10. Portola, V.A. (2002). Obosnovanie i razrabotka sposobov obnaruzheniia, lokatsii i kontrolya za khodom tusheniia ochagov samovozgoraniia uгля v shakhtakh [Substantiation and development of methods for detection, location and control over the extinguishing coal spontaneous combustion spots in mines]. *Doctor's thesis, Kemerovo [in Russian].*
  11. Mogilat, V.L. (2005). Osnovnyie prichiny vozniknoveniia i razvitiia opasnykh proizvodstvennykh situatsii na gornodobyvaiushchikh predpriiatiakh [The main reasons for the origin and development of hazardous industrial situations at mining enterprises]. *Gorny informatsionno-analiticheskii biulleten – Mining Informational Analytical Bulletin, 1, 70-72 [in Russian].*
  12. Yakovlev, V.L., Mogilat, V.L., & Tarasov, P.I. (2009). Prichiny avariinosti na tekhnologicheskome avtotransporte karierov i puti ieio snizheniia [Causes of accidents on the opencast mine technological road transport and ways to reduce it]. *Gorny informatsionno-analiticheskii biulleten – Mining Informational Analytical Bulletin, 1, 211-217 [in Russian].*
  13. Gusev, A.I. (2007). Snizhenie travmatizma i avariinosti na gornodobyvaiushchikh predpriiatiakh na osnove integratsii sistemy upravleniia promyshlennoi bezopasnostiiu [Reduction of injuries and accidents at mining enterprises on the basis of the industrial safety management system integration]. *Gorny informatsionno-analiticheskii biulleten – Mining Informational Analytical Bulletin, 12, 51-55 [in Russian].*

## Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности (Industrial Safety)

ISSN 2072-6554

DOI 10.26631/issn.2072-6554 



### Журнал включен в Перечень ВАК

«Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

### Тираж 1000 экземпляров

Выходит с 2005 года ежеквартально (в марте, июне, сентябре и декабре). Электронный архив в свободном доступе на сайте Вестника [ind-saf.ru](http://ind-saf.ru), а так же на сайтах научных электронных библиотек [elibrary.ru](http://elibrary.ru) и [cyberleninka.ru](http://cyberleninka.ru)

### Включен в мировые базы

Вестник проходит индексацию в российских базах данных научного цитирования **РИНЦ**, а так же в международных базах **DOAJ**, **Google Scholar**, **ICI World of Journals**, **ICI Journals Master List 2016**, **ResearchBib**, **SIS**. Включен в каталог периодических изданий **Ulrichsweb**.

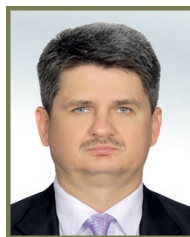


Мы открыты также для партнёрских отношений и готовы пригласить Вас в ряды наших авторов:  
[ind-saf@yandex.ru](mailto:ind-saf@yandex.ru) [ind-saf.ru](http://ind-saf.ru)



■ **С. А. Лисаков // S. A. Lisakov**  
foxlsa@mail.ru

инженер кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
chair engineer of Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia



■ **Е. В. Сыпин // Ye. V. Syrin**  
sev@bti.secna.ru

канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
candidate of technical sciences, chair professor of Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia



■ **А. Н. Павлов // A. N. Pavlov**  
pan@bti.secna.ru

канд. техн. наук, доцент Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
candidate of technical sciences, associate professor of Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia



■ **Ю. А. Галенко // Yu. A. Galenko**

д-р физ.-мат. наук, профессор Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова», 659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27  
doctor of phys.-math. sciences, chair professor of Biysk Technological Institute (branch) of the Polzunov Altai State Technical University, 27, Trofimov Street, Biysk, 659305, Russia

УДК 536.46/ 614.83

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА НЕСТАЦИОНАРНОГО ГОРЕНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ MODELING OF METHANE-AIR MIXTURE NONSTATIONARY COMBUSTION PROCESS IN COAL MINES

Выполнено моделирование процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах. Сформулированы аналитические зависимости для выполнения моделирования нестационарного горения метано-воздушной смеси на базе программного комплекса FlowVision. Проверена адекватность компьютерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературе для 7 экспериментов, а также на собственных экспериментальных данных. Средняя относительная погрешность модели составляет от 10 до 20 %. Разработанная модель масштабируется на трубы с большими диаметрами от 2 до 4 м и может быть применима для расчета нестационарного горения в условиях угольных шахт. Проведено моделирование нестационарного горения для условий угольной шахты. В результате для рассматриваемых конфигураций шахт установлено, что: максимальная скорость фронта пламени при детонации достигает 1400 м/с; максимальная температура в расчетной области при детонации составляет 2440 °С; максимальное избыточное давление при детонации составляет 4 МПа; расчетные значения плотности потока излучения при детонации достигают 2200 кВт/м<sup>2</sup>.

*Modeling of methane-air mixture nonstationary combustion process in coal mines is performed. Analytical dependencies are formulated to perform modeling of methane-air mixture nonstationary combustion on the basis of FlowVision software complex. The adequacy of the computer model on the experimental data, given in the literature for 7 experiments, as well as on its own experimental data was verified. The average relative error of the model is from 10 to 20 %. The developed model is scaled for pipes with large diameters from 2 to 4 m and can be used to calculate non-stationary combustion for coal mine conditions. Modeling of nonstationary combustion for coal mine conditions was carried out. As a result, for the considered configurations of the mines it is established that: the maximum velocity of the flame front during detonation reaches 1400 m/s; the maximum temperature in the calculated region during detonation is 2440 °C; the maximum overpressure at detonation is 4 MPa; the calculated values of the radiation flux density at detonation reach 2200 kW / m<sup>2</sup>.*

**Ключевые слова:** МОДЕЛИРОВАНИЕ, НЕСТАЦИОНАРНОЕ ГОРЕНИЕ, МЕТАНО-ВОЗДУШНАЯ СМЕСЬ, ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ, УГОЛЬНАЯ ШАХТА

**Key words:** MODELING, NONSTATIONARY COMBUSTION, METHANE-AIR MIXTURE, COMBUSTION TO DETONATION TRANSITION, COAL MINE



**В**ведение  
 В Бийском технологическом институте в рамках гранта РФФИ № 17-08-00844 осуществляется разработка научных основ для создания автоматической системы взрывоподавления на базе оптико-электронных датчиков, способной оценивать скорость фронта пламени и оперативно принимать решения по способу локализации горения до перехода его в детонацию [1, 2]. При этом необходимым базисом является исследование процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси для условий, характерных в угольных шахтах, на основе математического моделирования.

В работе [2] выполнена постановка задачи моделирования нестационарного горения, выбраны подходы к исследованию и моделированию турбулентных течений при нестационарном горении и сформулированы исходные данные для моделирования.

Исходные данные для проведения моделирования, приведенные в таблице 1.

Целью данной работы является проведение исследования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси для условий угольной шахты на базе компьютерного моделирования.

Задачами при выполнении моделирования являются:

- сформулировать аналитические зависимости для выполнения моделирования нестационарного горения метано-воздушной смеси;
- проверить адекватность компьютерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературе, а также на собственных экспериментальных данных;
- оценить масштабируемость компьютерной модели на трубы с диаметрами, сопоставимыми с шириной выработки шахт, с учетом экспериментальных данных, приведенных в литературе;
- провести исследование нестационарного горения для условий угольной шахты и определить скорость горения, температуру, давление, плотность потока излучения продуктов горения.

**Модель нестационарного горения метано-воздушной смеси**

После анализа возможных вариантов реализации модели горения метано-воздушной смеси [2] предпочтение было отдано специализированному программному обеспечению FlowVision [3], в котором присутствуют все математические модели, указанные в исходных данных.

При моделировании нестационарного горения в FlowVision решаются полные уравнения Навье-Стокса (уравнение неразрывности и уравнение движения), уравнение энергии, уравнение состояния газа, уравнения для скалярных

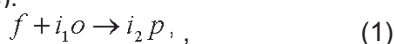
Таблица 1. Исходные данные для проведения моделирования [2]  
 Table 1. Initial data for modeling [2]

Параметр	Значение
Модель турбулентного течения	Модель на базе осредненных нестационарных уравнений Навье-Стокса (URANS)
Модель для турбулентных переменных $k$ и $\epsilon$	Стандартная $k$ - $\epsilon$ модель
Модель горения	Одностадийная необратимая реакция горения стехиометрической метано-воздушной смеси
Модель скорости брутто реакции	Модель вихревой диссипации (EDM)
Модель переноса энергии излучением	Диффузионная модель P-1
Модель для расчета коэффициента поглощения продуктов горения	Модель взвешенной суммы серых газов (BCCG)
Граничные условия	Трубы диаметрами 2 и 3 м с одним закрытым и одним открытым концом и кольцевыми перегородками с параметрами $S=0,15-0,4 \cdot D$ ; $BR=0,05-0,15$ , поджиг располагается у закрытого конца трубы
Температура воспламенения (для поджига)	650 °C
Массовый стехиометрический коэффициент (метан-воздух)	17,24
Температура смеси	20 °C
Давление	105 Па

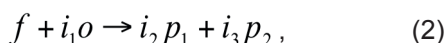
величин, описывающих концентрацию топлива, окислителя, продуктов сгорания. Уравнения решаются с помощью метода конечных объемов [4].

Модель горения FlowVision предполагает, что в смеси присутствуют минимум, три вещества и протекает одна необратимая брутто-реакция [4].

При этом можно задать брутто-реакцию, в которой образуется один продукт (в общем случае - смесь газов):



либо реакцию, в которой образуется два продукта:



где  $f$  – компонент «горючее»;  $o$  – компонент «окислитель»;  $p$  – компонент «продукты горения»;  $i_1$  – массовый стехиометрический коэффициент при окислителе;  $i_{2,3}$  – массовые стехиометрические коэффициенты при продуктах горения  $p_1$  и  $p_2$ .

Для приведённых далее уравнений предполагается более общая реакция (2).

Для компонента «горючее» в общем случае решаются однородное уравнение для восстановленной массовой доли горючего:

$$\frac{\partial(\rho Y_f^*)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_f^* V) + \vec{\nabla} \cdot J_{f,eff}^* = 0, \quad (3)$$

и неоднородное – для истинной массовой доли горючего:

$$\frac{\partial(\rho Y_f)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho Y_f V) + \vec{\nabla} \cdot J_{f,eff} = -W_f, \quad (4)$$

где  $\rho$  – плотность смеси,  $кг/м^3$ ;  $Y_f$  – истинная массовая доля горючего;  $V$  – вектор скорости потока газовой смеси,  $м/с$ ;  $J_{f,eff}$  – диффузионный поток компонентов газовой смеси,  $кг \cdot м^{-2} \cdot с^{-1}$ ;  $W_f$  – скорость реакции горения,  $кг/(м^3 \cdot с)$ .

Звёздочка (\*) обозначает восстановленные массовые доли и диффузионные потоки компонентов газовой смеси.

Выражение для скорости реакции горения в уравнении (4) определяется моделью вихревой диссипации (EDM) [4]:

$$W_f = C \left( \frac{\mu \varepsilon}{\rho \kappa^2} \right)^{0.25} \rho \frac{\varepsilon}{k} \min \left( Y_f, \frac{Y_o}{i_1} \right), \quad (5)$$

где  $C=23,6$  – параметр константы турбулентной реакции, взятый из работы [5];  $\mu$  – динамический коэффициент молекулярной вязкости,  $Па \cdot с$ ;  $k$  – турбулентная энергия  $м^2 \cdot с^{-3}$ ;  $\varepsilon$  – скорость диссипации турбулентной энергии,  $м^2 \cdot с^{-3}$ ;  $\rho$  – плотность,  $кг/м^3$ .

Истинная массовая доля окислителя определяется по условию [4]:

$$Y_o^* = \begin{cases} Y_o^* - \Delta f \cdot i_1, & \text{если } Y_o^* > \Delta f \cdot i_1 \\ 0, & \text{иначе} \end{cases} \quad (6)$$

Восстановленная массовая доля окислителя  $Y_o^*$  вычисляется по формуле (7) [4]:

$$Y_o^* = 1 - Y_f^* - Y_{p1}^* - Y_{p2}^* - \sum_{i=p2+1}^N Y_i^*. \quad (7)$$

Истинные массовые доли продуктов горения  $Y_{p1}$  и  $Y_{p2}$  вычисляются по формулам (8), (9):

$$\begin{aligned} Y_{p1} &= Y_{p1}^* + \Delta f \cdot i_2 \\ Y_{p2} &= Y_{p2}^* + \Delta f \cdot i_3 \end{aligned}; \quad (8)$$

$$\Delta f = Y_f^* - Y_f. \quad (9)$$

Удельная термодинамическая энтальпия находится в результате решения уравнений (10, 11) итерационным методом:

$$h(T) = \sum_{i=1}^N h_i(T) Y_i; \quad (10)$$

$$h_i(T_{abs}) = h_0(298.15) + \int_{298.15}^{T_{abs}} C_p(T) dT, \quad (11)$$

где  $h_0$  – энтальпия образования при  $298.15 K$ ,  $м^2 \cdot с^{-2}$ ;  $C_p$  – удельная теплоёмкость  $Дж \cdot кг^{-1} \cdot K^{-1}$ ;  $Y_i$  – массовая доля вещества  $i$ ;  $T$  – температура,  $K$ .

В программном комплексе FlowVision момент инициирования горения описывается возникновением соответствующей температуры воспламенения в заданной области.

В качестве модели для турбулентных переменных  $k$  и  $\varepsilon$  используется стандартная  $k$ - $\varepsilon$  модель. Модель переноса энергии излучением представляет собой диффузионную модель P-1. Описание данных моделей приводится в документации на программный комплекс FlowVision [3].

Модель для расчета коэффициента поглощения продуктов горения представляет собой модель взвешенной суммы серых газов (ВССГ), которая не входит в FlowVision. Поэтому данная модель была реализована отдельно с помощью компонента “Редактор формул”.

Коэффициент поглощения продуктов горения  $a$  рассчитывается по формуле [6-8]:

$$a = - \frac{\ln(1 - \varepsilon_{изл})}{s}, \quad (12)$$

где  $\varepsilon_{изл}$  – коэффициент излучения продуктов горения;  $s$  – толщина слоя продуктов горения,  $м$ .

Коэффициент излучения продуктов горения рассчитывается согласно выражению [6-8]:

$$\varepsilon_{изл} = \sum_{i=0}^I a_i(T)(1 - e^{-k_i p_{sum}^s}), \quad (13)$$

где  $a_i$  – весовой коэффициент излучения для  $i$ -того серого газа,  $k_i$  – коэффициент поглощения для  $i$ -того серого газа,  $(атм \cdot м)^{-1}$ ;  $p_{sum}$  – сумма парциальных давлений всех поглощающих газов,  $атм$ ,  $T$  – температура,  $K$ ,  $I$  – количество серых газов.

Весовой коэффициент излучения для  $i=0$  рассчитывается по формуле:

$$a_0 = 1 - \sum_{i=1}^I a_i, \quad (14)$$

Весовые коэффициенты излучения для  $i>0$  определяются полиномиальной функцией [6-8]:

$$a_i = \sum_{j=1}^J b_{i,j} T^{j-1}, \quad (15)$$

где  $b_{i,j}$  – полиномиальные коэффициенты;  $J$  – количество полиномиальных коэффициентов.

Значения коэффициентов  $k_i$  и  $b_{i,j}$  взяты из источника [8] для продуктов горения метано-воздушной смеси – паров воды и углекислого газа при отношении их парциальных давлений  $p_{h_2O}/p_{CO_2}=2$ . Коэффициенты представлены в таблице 1.

Для учета влияния давления на коэффициент поглощения в модель ВССГ вводятся поправки в виде масштабирующих коэффициентов с учетом данных представленных в работе [9]. При полном давлении  $P_n > 1,1 атм$ , вместо  $k_i$  используется выражение:

$$k_i \rightarrow k_i P_n^m, \quad (16)$$

где  $m=0,2$  – коэффициент, определенный с учетом температуры и парциальных давлений продуктов горения метано-воздушной смеси из литературных данных [9].

### Расстановка граничных условий в расчетной области

Расчетная область представляет собой трубу с одним закрытым и одним открытым концом и препятствиями внутри трубы. Поджиг располагается у закрытого конца. Препятствия, турбулизирующие горение, представляют собой кольцевые перегородки, регулярно расположенные по длине трубы.

Параметрами перегородок являются шаг установки  $S$ , пропорциональный диаметру трубы  $D$ , и степень затенения сечения кольцевыми перегородками  $BR$  (отношение площади препятствия к площади поперечного сечения трубы).

Решение задачи моделирования нестационарного горения в трубе с препятствиями выполняется в двумерной постановке для со-

кращения вычислительных затрат. Задача решается в вертикальной плоскости симметрии, соответствующей продольному сечению трубы.

Для двумерной постановки задачи высота кольцевого препятствия определяется, как  $h=(D/2) \cdot BR$  согласно [10] (рис. 1). Данная зависимость дает несколько завышенное значение по высоте по сравнению с фактически использованным в эксперименте [10].

Грани, соответствующие продольному сечению трубы (выделены черным цветом на рис. 2), имеют тип граничного условия – «Симметрия» (используется терминология программного комплекса FlowVision): твердая поверхность, на которой реализуются условия непротекания и проскальзывания для переменной «Скорость». Грани, ограничивающие трубу сверху и снизу, закрытый конец трубы и кольцевые перегородки (выделены белым цветом на рис. 2) имеют тип граничного условия – «Стенка»: поверхности, имитирующие твердые преграды. Открытый конец трубы (выделен красным цветом на рис. 2) имеет тип – «Свободный выход»: поверхность, через которую поток выходит из расчетной области. Источник зажигания (модификатор «Поджиг») располагается в центре грани, соответствующей закрытому концу трубы.

Начальная расчетная сетка принята равномерной в плоскости симметрии. Количество расчетных ячеек по направлениям  $x \times y \times z$  задавалось соответственно  $1000 \times 1 \times 20$ . Таким обра-

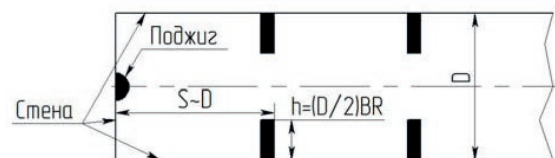


Рисунок 1 – Геометрия расчетной области  
Figure 1 – Geometry of the computational region

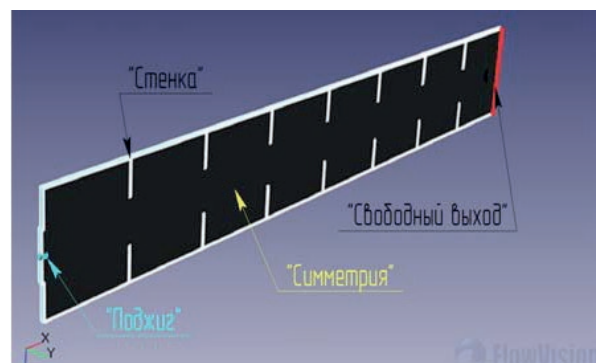


Рисунок 2 – Расстановка граничных условий и расположение модификатора «поджиг»  
Figure 2 – The arrangement of the boundary conditions and the location of the «ignition» modifier

зом, общее число расчетных ячеек равно 20000. При выполнении расчета устанавливалась «Неявная» схема интегрирования (2-й порядок точности) [3].

На первых 10 итерациях шаг по времени задавался постоянным с учетом отношения характерного размера области расчета к характерной скорости в ней. На последующих итерациях шаг по времени задавался числом Куранта  $CFL \leq 1$  (шаг по времени меняется в процессе расчета с учетом его результатов) [3].

В качестве опорных величин при моделировании в программном комплексе FlowVision установлены атмосферное давление равное  $10^5$  Па и температура 273 К. Таким образом, температура в расчетной области выражается в град. С и используется избыточное давления вместо абсолютного. В качестве начальных условий установлена температура смеси равная 20 °С (соответствует средней температуре по шахте), а избыточное давление установлено 0 Па [11].

В расчетной области изначально задается предварительно перемешанная метано-воздушная смесь со стехиометрической массовой относительной концентрацией метана равной 0,0548. Поджиг смеси выполняется с помощью модификатора. Температура воспламенения смеси составляет 650 °С.

В соответствии с сформулированными граничными условиями, параметрами расчета и исходными данными было проведено компьютерное моделирование нестационарного горения метано-воздушных смесей.

#### Проверка адекватности компьютерного моделирования

Проверка адекватности моделирования выполняется с использованием данных экспериментальных исследований, приведенных в работах [10, 12-16], и данных собственных экспериментальных исследований по нестационарному горению в трубах с регулярными препятствиями.

В работах [10, 12-13] эксперименты проводились в детонационных трубах с одним открытым и одним закрытым концом. Поджиг смеси выполнялся на закрытом конце трубы с помощью электрической искры. Для измерения давления и скорости фронта пламени использовались быстродействующие пьезоэлектрические преобразователи давления и фотодиоды.

*Трубы с кольцевыми перегородками*

В работе [12] эксперименты проводились для начальных условий, соответствующих температуре  $T = 293$  К и давлению 101 кПа, с использованием метано-воздушных смесей с объемными концентрациями от 5,5 до 17 %. Чистота

метана составляла 99,9 %. Эксперименты проводились в двух детонационных трубах. Первая труба имела длину 12 м и внутренний диаметр 0,174 м. Вторая труба имела внутренний диаметр 0,52 м и длину 34,5 м. Трубы оснащены кольцевыми перегородками со степенью затенения сечения  $BR=0,3$  и 0,64; расстояние между препятствиями равно диаметру трубы  $S=D$ .

Моделирование выполнялось для геометрических параметров труб и кольцевых препятствий и условий проведения, соответствующих экспериментальным. При этом использовалась метано-воздушная смесь с концентрацией 9,5 %.

Шаг по времени на первых 10 итерациях для труб с  $D=S=0,174$  м равен  $10^{-6}$  с. Для труб с  $D=S=0,52$  м шаг по времени равен  $10^{-5}$  с.

Зависимости скорости распространения фронта пламени по длине трубы, полученные экспериментально и с помощью моделирования для стехиометрических метано-воздушных смесей, приведены на рис. 3.

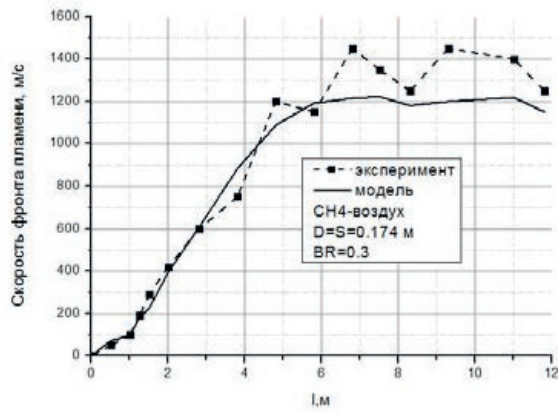
Скорости фронта пламени, рассчитанные по модели, хорошо согласуются с экспериментальными для труб с диаметрами 0,174 и 0,52 м и  $BR=0,3$ , что видно из рис. 3а и 3б. Средняя относительная погрешность расчета скорости фронта пламени для эксперимента с параметрами  $D=S=0,174$  м,  $BR=0,3$ ,  $l=12$  м (рис. 3а) составила 11%, а для эксперимента  $D=S=0,52$  м,  $BR=0,3$ ,  $l=35$  м (рис. 3б) – 14%.

Для экспериментов с параметрами  $D=S=0,52$  м,  $BR=0,6$ ,  $l=35$  м (рис. 3в) и  $D=S=0,174$  м,  $BR=0,6$ ,  $l=35$  м (рис. 3г) расчетные значения скорости фронта пламени хорошо согласуются с экспериментальными только на начальных участках труб. На дальнейших участках труб в экспериментах в отличие от расчетов переход горения в детонацию не наблюдается, что обуславливает погрешности по расчету скоростей около 40%. Расхождения могут быть обусловлены неучтенными в модели потерями энергии, а также объемными эффектами в реальной трубе, не учитываемыми при двумерном моделировании [13].

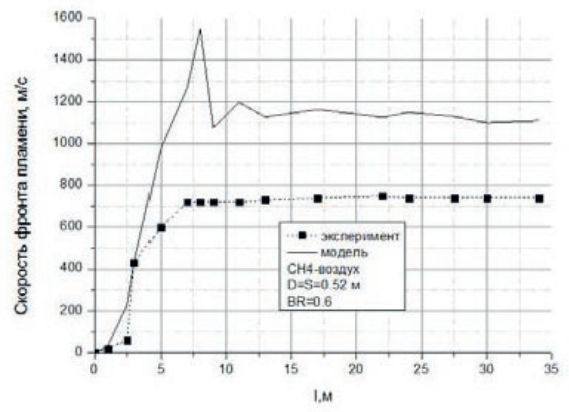
Измеренные датчиками в экспериментах [11] максимальные значения давления по длине трубы составляют от 2 до 3 МПа. Расчетные значения составляют от 1,8 до 3,2 МПа, что хорошо согласуется с данными эксперимента.

*Трубы с односторонними перегородками в виде балок*

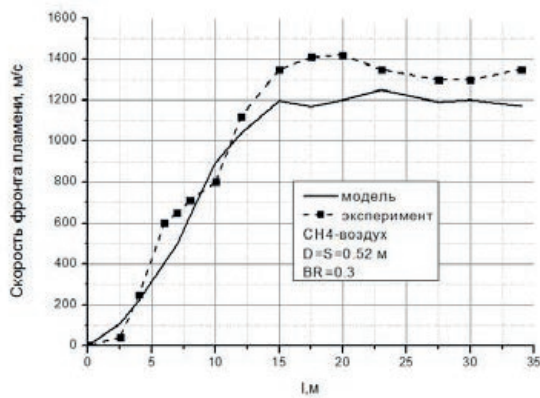
В работах [10, 13] приведены результаты экспериментов для детонационной трубы (длина 73 м, внутренний диаметр 0,105 м), оснащенной 15-ю перегородками в виде балок, размещенных



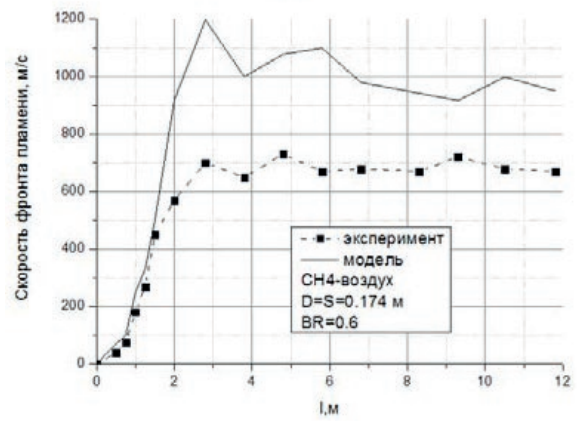
а



б



в



г

Рисунок 3 – Скорости распространения фронта пламени по длине трубы с кольцевыми перегородками  
 в –  $D=S=0.52$  м,  $BR=0.6$ ,  $l=35$  м; а –  $D=S=0.174$  м,  $BR=0.6$ ,  $l=35$  м;  
 Figure 3 – Speeds of the flame front propagation along the length of the pipe with annular baffles  
 а –  $D=S=0.174$  м,  $BR=0.3$ ,  $l=12$  м; б –  $D=S=0.52$  м,  $BR=0.3$ ,  $l=35$  м

с одной стороны и имеющих степень затенения сечения 0,25 и 0,5. Расстояние между перегородками составляло 1,52 м. Эксперименты проводились для атмосферных начальных условий при температуре  $T=293$  К и давлении 101 кПа с использованием смесей природный газ-воздух с объемными концентрациями от 5,1 до 15 %. Содержание метана в природном газе составляло не менее 90 %.

При реализации в программном FlowVision комплексе модель была модернизирована в соответствии с видом препятствий и значениями геометрических параметров труб и препятствий. Условия проведения моделирования задавались в полном соответствии с условиями проведения экспериментов.

При моделировании использовалась стехиометрическая смесь природный-газ воздух (9,5 % природного газа). Шаг по времени на первых 10 итерациях равен  $10^{-4}$  с.

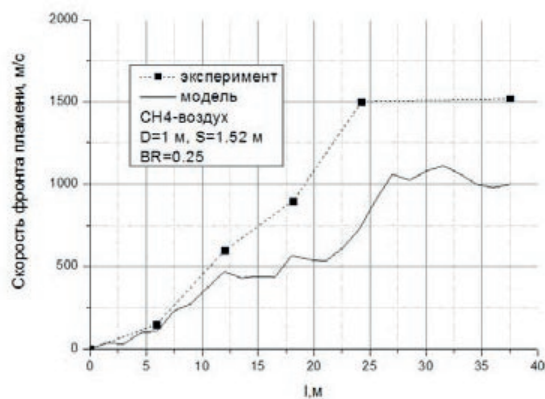
Зависимости скорости распространения фронта пламени по длине трубы, полученные

экспериментально и с помощью моделирования для смеси природный-газ воздух (9,5 % природного газа) приведены на рис. 4.

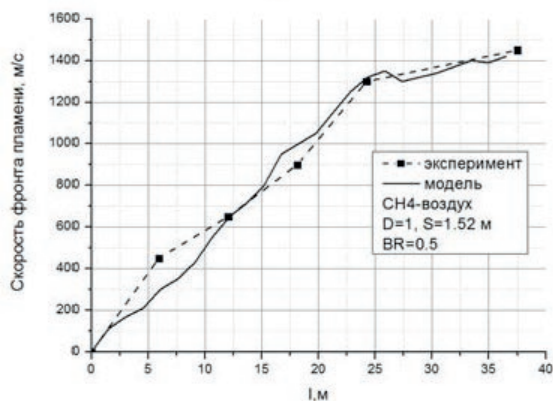
Для эксперимента с  $BR=0.25$  (рис. 4а) расчетные значения скорости фронта пламени хорошо согласуются с экспериментальными на начальном участке трубы (до 12 м) – относительная погрешность не превышает 25 %. На дальнейших участках труб расчетная скорость занижена по сравнению с экспериментальной. Переход горения в детонацию наблюдается как для эксперимента, так и при моделировании. Расхождения могут быть обусловлены объемными эффектами, не учитываемыми при двумерном моделировании.

Для эксперимента с  $BR=0.5$  (рис. 4б) расчетные значения скорости фронта пламени хорошо согласуются с экспериментальными – относительная погрешность не превышает 20 %.

Максимальное избыточное давление в различных точках по длине трубы, измеренное экспериментально и рассчитанное по модели,



а



б

Рисунок 4 – Скорости распространения фронта пламени по длине трубы с односторонними перегородками в виде балок  
 а –  $D=1$  м,  $S=1.52$  м,  $BR=0.25$ ; б –  $D=1$  м,  $S=1.52$  м,  $BR=0.5$   
 Figure 4 – Velocities of flame front propagation along the length of the pipe with one-sided partitions in the form of beams  
 а –  $D=1$  м,  $S=1.52$  м,  $BR=0.25$ ; б –  $D=1$  м,  $S=1.52$  м,  $BR=0.5$

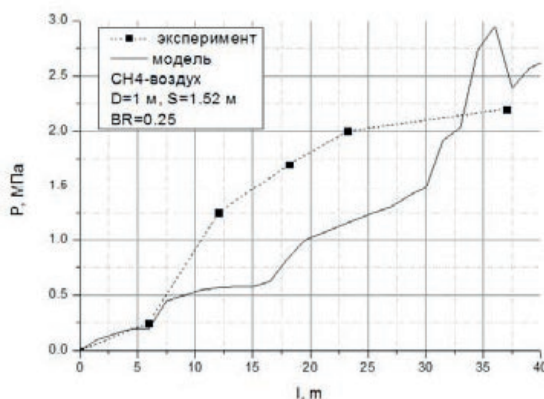
приведено на рис. 5.

Экспериментальные и расчетные данные для максимального избыточного давления удовлетворительно согласуются друг с другом.

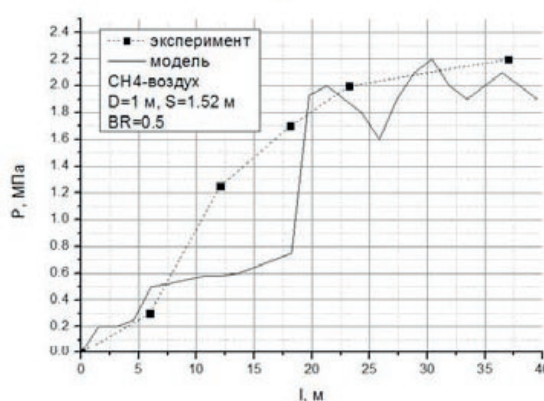
**Собственные экспериментальные исследования**

Собственные экспериментальные исследования проводились коллективом авторов для стехиометрической пропано-воздушной смеси для начальных условий, соответствующих температуре  $T=293$  К и давлению  $101$  кПа. Эксперименты проводились в детонационной трубе с одним открытым и одним закрытым концом, имеющей длину  $4$  м и внутренний диаметр  $0,5$  м. Труба была оснащена кольцевыми перегородками со степенью затенения сечения  $BR=0,3$ . Измерение скорости фронта пламени выполнялось с помощью быстродействующих фотодиодных датчиков.

Моделирование выполнялось для условий эксперимента. Шаг по времени на первых 10



а



б

Рисунок 5 – Максимальное избыточное давление в различных точках трубы  
 а –  $D=1$  м,  $S=1.52$  м,  $BR=0.25$ ; б –  $D=1$  м,  $S=1.52$  м,  $BR=0.5$   
 с односторонними перегородками в виде балок  
 Figure 5 – Maximum overpressure at different pipe points with single-sided bulkheads in the form of beams  
 а –  $D=1$  м,  $S=1.52$  м,  $BR=0.25$ ; б –  $D=1$  м,  $S=1.52$  м,  $BR=0.5$

итерациях равен  $10^{-4}$  с.

Зависимости скорости распространения фронта пламени по длине трубы, полученные экспериментально и с помощью моделирования для стехиометрической пропано-воздушной смеси, приведены на рис. 6.

Экспериментальная скорость фронта пламени и расчетная хорошо согласуются друг с другом. Средняя относительная погрешность расчета скорости составляет  $18\%$ .

**Экспериментальные угольные шахты**

В работе [14] представлены результаты экспериментов по исследованию скорости пламени в экспериментальной шахте Лэйк Линн (США). Результаты моделирования сопоставлялись результатами эксперимента № 347. Исследование проводилось в шахте с сечением  $2*5,5$  м на участке длиной  $60$  м. Первые  $14$  м оборудованы креплениями водяного барьера, турбулизаторами пламя. Крепления представляют собой полки, закрепленные к потолку шахты и

расположенные на расстоянии  $0,5$  м от потолка. Ширина полок составляет  $0,3$  м. Крепления располагаются на расстоянии  $2$  м друг от друга по длине шахты. Остальной участок шахты по длине от  $14$  до  $60$  м не имеет регулярных препятствий. Однако при его моделировании устанавливалась шероховатость стен шахты равная  $0,1$  м. Концентрация метана в смеси с воздухом составляла  $9\%$  об.

Результаты расчета скорости фронта пламени и экспериментальные данные (эксперимент № 347, Лэйк Линн) представлены на рис. 7.

Экспериментальные данные о скорости фронта пламени и результаты ее расчетов на базе компьютерного моделирования удовлетворительно согласуются друг с другом. Расхождения могут быть обусловлены неучтенными объемными эффектами и отклонениями при задании геометрии реальной шахты при моделировании.

В работе [15] представлены результаты экспериментов по исследованию скорости пламени в экспериментальной шахте Брюстон (США). Исследование проводилось в шахте с сечением  $2 \times 2,7$  м на участке с длиной  $20$  м. Первые  $15$  м оборудованы кольцевой крепью со степенью затенения сечения  $BR=0,19$ . Элементы крепи имеют ширину  $0,2$  м и высоту  $0,19$  м и располагаются на расстоянии  $1,5$  м друг от друга. Остальной участок шахты по длине от  $15$  до  $20$  м имеет регулярные препятствия шириной  $0,2$  м и высотой  $0,32$  м, располагаемые с одной стороны на расстоянии  $3$  м друг от друга. Концентрация природного газа в смеси с воздухом составляла  $8,5\%$  об.

Результаты расчета скорости фронта пламени и экспериментальные данные для шахты Брюстон представлены на рис. 8.

Из рис. 8 видно удовлетворительное соответствие экспериментальных данных о скорости фронта пламени и результатов расчетов на базе компьютерного моделирования.

По результатам проверки адекватности установлено, что разработанная компьютерная модель применима для расчета параметров нестационарного горения метано-воздушных смесей в трубах и шахтах с регулярными препятствиями.

#### Оценка масштабируемости компьютерной модели

Известные экспериментальные исследования нестационарного горения, как правило, проводятся в трубах с диаметрами меньшими, чем диаметр шахты (от  $0,17$  до  $1$  м), что связано с большой сложностью, трудоемкостью и высо-

кой стоимостью исследований в трубах большого диаметра ( $3$  м и более).

Следовательно, важно сопоставить результаты исследований с учетом их масштабируемости на большие диаметры труб. Сопоставление может быть выполнено для экстраполированных экспериментальных данных по отношению расстояния  $l$ , при котором проис-

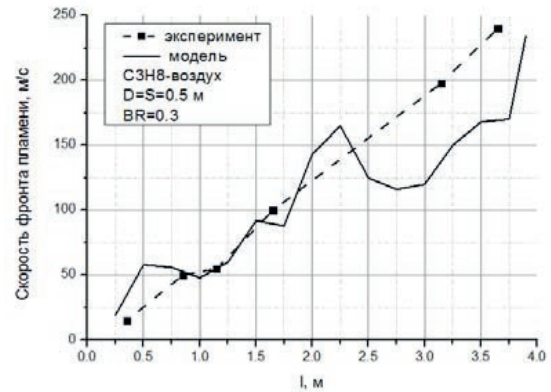


Рисунок 6 – Скорость распространения фронта пламени по длине трубы для собственных экспериментов  
Figure 6 – Flame front propagation speed along pipe length for the own experiments

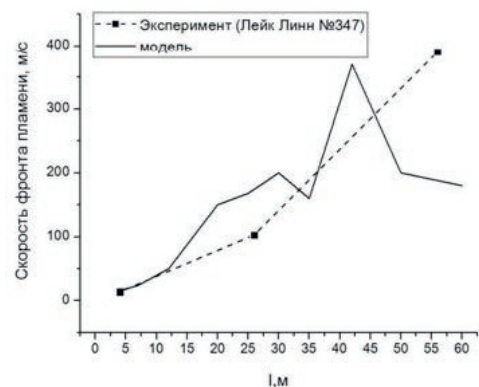


Рисунок 7 – Скорость распространения фронта пламени по длине шахты Лэйк Линн (эксперимент № 347)  
Figure 7 – Flame front propagation speed of the along the length of the Lake Lynn mine (experiment No. 347)

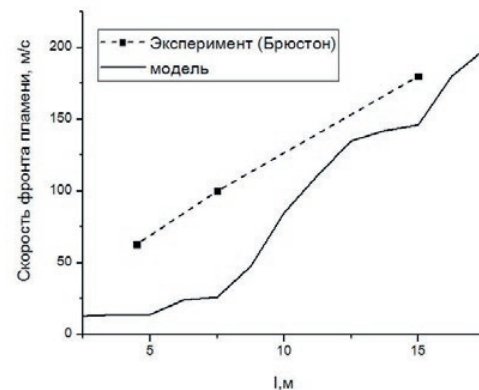


Рисунок 8 – Скорость распространения фронта пламени по длине шахты Брюстон  
Figure 8 – Flame front propagation speed along the Bristol mine

ходит переход горения в детонацию, к диаметру трубы  $D$  [10, 13]. Экспериментальные данные для труб меньшего диаметра 0,174, 0,52 м при  $BR=0.3$  с кольцевыми перегородками и трубы диаметром 1 м при  $BR=0.25$  с перегородками в виде балок, размещенных с одной стороны в трубе, сопоставляются с данными моделирования для этих труб (рис. 9).

Для трубы диаметром 3 м с модельными данными сопоставляются экстраполированные экспериментальные данные (пунктирная линия). При этом моделируется труба с  $BR=0.3$  и с перегородками, расположенными с одной стороны.

Значения отношения  $l/D$  для модели и для эксперимента уменьшаются с увеличением диаметра трубы. Расстояние, при котором происходит переход горения в детонацию  $l$ , для труб с односторонними перегородками меньше, чем для труб с кольцевыми перегородками [10, 13]. Отношение  $l/D$  (по результатам моделирования) для диаметра 1 м равно 23,5, для 3 м – 21,5.

Таким образом, модель является масштабируемой на трубы с диаметрами от 2 до 4 м.

### Результаты компьютерного моделирования нестационарного горения для условий угольной шахты

Развитие турбулизированного горения для условий угольной шахты определяется наличием различных препятствий, геометрическими параметрами шахты и формы выработок [16].

Минимальная площадь поперечного сечения для различных условий проведения выработки находится в пределах от 5,4 до 7 м<sup>2</sup> при ширине и высоте около 2,5 м. Максимальное значение площади поперечного сечения, как правило, не превышает 30 м<sup>2</sup> для ширины 6 м и высоты 5 м [16].

Препятствиями в угольных шахтах наиболее часто являются крепи выработок и различ-

ное оборудование. Расположение крепи в выработках имеет регулярную структуру и строго регламентировано [16], что позволяет исследовать ее влияние на турбулентное горение.

В рамках выполнения исследования рассматривается влияние на турбулизацию горения препятствий в виде крепи выработок угольных шахт. Для крепи используют двутавровые балки высотой 0,14-0,2 м, рельсы высотой 0,1-0,14 м и специальный взаимозаменяемый профиль высотой 0,088-0,137 м. Расстояние между элементами крепи (балками, рельсами и т.д.) по длине выработки принимают равным от 0,5 до 1,25 м [16].

Диаметр трубы, пересчитанный через площадь сечения выработки угольной шахты, составляет от 2 до 3 м. С учетом геометрических параметров крепи выработок параметры перегородок для диаметра  $D=2$  м составляют  $S=0,5$  и 1,25 м,  $BR=0,2$ , а для  $D=3$  м -  $S=0,45$  и 1,2 м,  $BR=0,15$ .

При моделировании шаг по времени на первых 10 итерациях для труб с геометрическими параметрами, соответствующими угольной шахте, принимался равным  $10^{-3}$  с.

Результаты расчета скорости распространения фронта пламени по длине трубы с геометрическими параметрами, характерными для угольных шахт, приведены на рис. 10.

При моделировании нестационарного горения для угольных шахт с эквивалентным диаметром 2 м и при  $S=0.5$ , и при  $S=1.25$  м наблюдается переход горения в детонацию. Для  $S=1.25$  м максимальная скорость фронта на пламени достигает 1400 м/с; для  $S=0.5$  м – 1000 м/с.

Для угольных шахт с эквивалентным диаметром 3 м переход горения в детонацию не наблюдается. Максимальная скорость фронта пламени достигает 742 м/с для  $S=1.2$  м и 556 м/с для  $S=0.45$  м.

Изменение максимальной температуры и избыточного давления в зависимости от времени для модели с параметрами  $D=2$  м,  $S=1.25$  м,  $BR=0.2$  приведено на рис. 11

Исходя из данных, представленных на рис. 11, переход горения в детонацию происходит через 1 с после воспламенения смеси. На начальной стадии температура горения составляет 1900 °С и является близкой к адиабатической температуре горения метано-воздушной смеси 1950 °С. Максимальная температура в расчетной области достигается при детонации (2440 °С), что согласуется данными, приведенными в литературе [10] – 2500 °С. На начальной стадии избыточное давление не превышает 10 кПа. Максимальное избыточное давление при

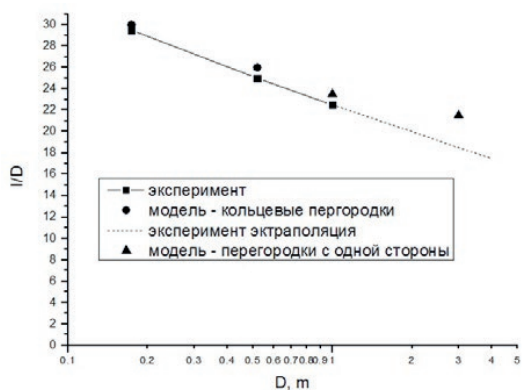
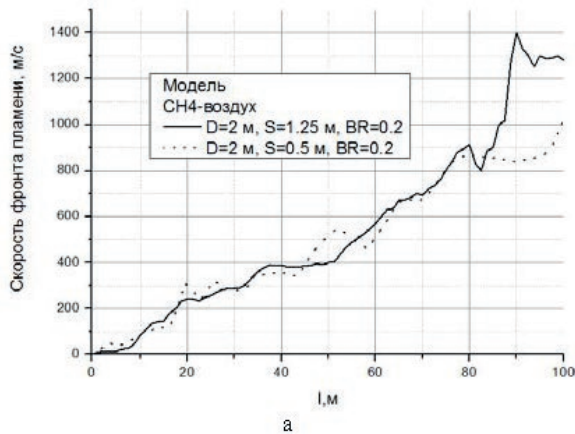
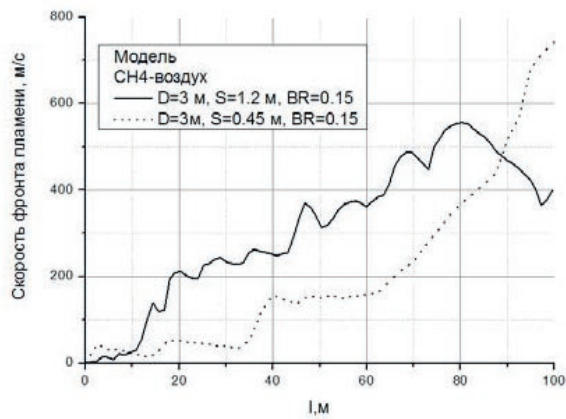


Рисунок 9 – Отношение  $l/D$  в зависимости от диаметра трубы  
Figure 9 – The ratio  $l/D$ , depending on the pipe diameter





а



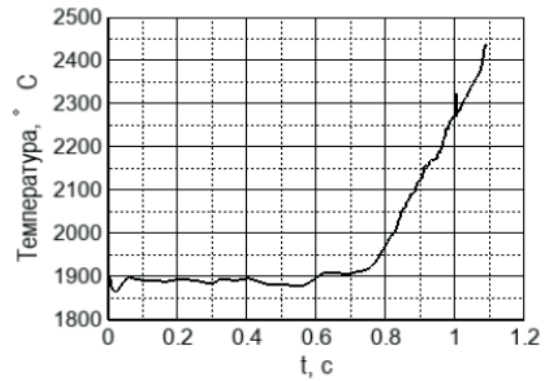
б

Рисунок 10 – Скорости распространения фронта пламени по длине трубы с  $D = 2$  и  $3$  м  
а –  $D=2$  м; б –  $D=3$  м  
Figure 10 – Flame front propagation velocities along the pipe with  $D = 2$  and  $3$  m  
а –  $D=2$  м; б –  $D=3$  м

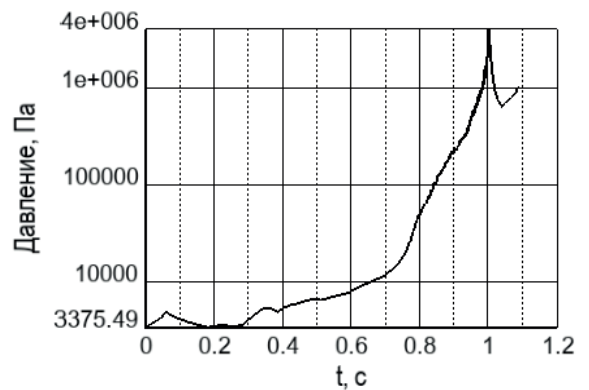
детонации достигает  $4$  МПа и согласуется с экспериментальными данными [10, 12].

Температурное поле для участков расчетной области в различные моменты времени при моделировании шахты с параметрами  $D=2$  м,  $S=1.25$  м,  $BR=0.2$  приведено на рис. 12.

Воспламенение метано-воздушной смеси инициируется с помощью точечного источника (поджига) у закрытого конца трубы. На начальной стадии формируется огненный шар, расширяющийся до стен трубы (рис. 12а). При этом возникают слабые волны сжатия, которые отражаются от поверхностей трубы, сталкиваются с пламенем и приводят к мелкомасштабным возмущениям. Возмущения приводят к увеличению поверхности пламени и, как следствие, к увеличению выделения энергии и более быстрому тепловому расширению горячих газов [10, 13]. Механизм ускорения пламени связан, главным образом, с ростом площади поверхности пламени [10, 13].



а



б

Рисунок 11 – Изменение максимальной температуры (а) и избыточного давления (б) в зависимости от времени для модели с параметрами  $D=2$  м,  $S=1.25$  м,  $BR=0.2$   
Figure 11 – Change in the maximum temperature (а) and overpressure (б) as a function of time for a model with parameters  $D = 2$  м,  $S = 1.25$  м,  $BR = 0.2$

На начальных участках трубы передний фронт пламени распространяется симметрично относительно продольной оси. При этом в верхней и нижней части между препятствиями остается несгоревшая смесь. В результате площадь поверхности пламени увеличивается (рис. 12б, 12в).

Со временем образуется расширенная зона реакции, распространяющаяся на расстоянии, в несколько раз превышающем диаметр трубы –  $30-40$  м (рис. 12г). Затем зона стабилизируется, поскольку сгорает смесь, расположенная далеко позади переднего фронта пламени [10, 13]. При этом средняя скорость фронта пламени становится постоянной – участок трубы от  $35$  до  $50$  м (рис. 12д).

Факторами, которые дополнительно увеличивают площадь поверхности пламени, являются взаимодействия пламени со слоями сдвига и рециркуляция на препятствиях. Ускорение потока при прохождении пламени через препят-

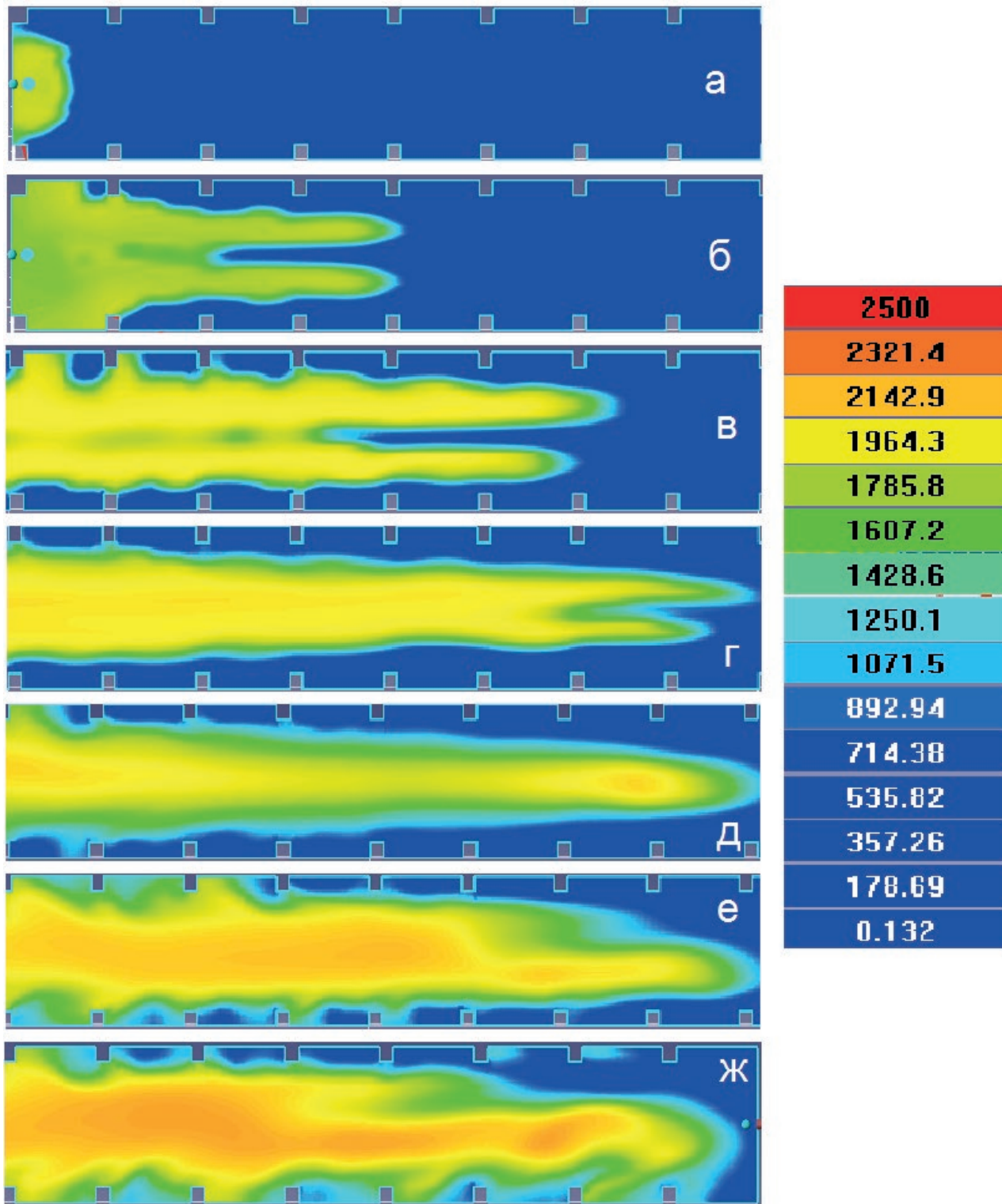


Рисунок 12 – Температурное поле (°C) для участков расчетной области в различные моменты времени при моделировании шахты с параметрами  $D=2$  м,  $S=1.25$  м,  $BR=0.2$

а – 0.0776 с, l: 0-10 м; б – 0.489 с, l: 0-10 м; в – 0.84 с, l: 10-20 м; г – 0.911 с, l: 30-40 м; д – 0.976 с, l: 70-80 м; е – 0.998 с, l: 85-95 м; ж – 1.00192 с, l: 90-100 м

Figure 12 – Temperature field (°C) for the calculation area sections at different times in the simulation of the mine with parameters  $D = 2$  m,  $S = 1.25$  m,  $BR = 0.2$

а – 0.0776 s, l: 0-10 m; б – 0.489 s, l: 0-10 m; в – 0.84 s, l: 10-20 m; г – 0.911 s, l: 30-40 m; д – 0.976 s, l: 70-80 m; е – 0.998 s, l: 85-95 m; ж – 1.00192 s, l: 90-100 m

ствии вызывает неустойчивость Рэлея-Тейлора (неустойчивость границы раздела между двумя средами разной плотности, которая возникает, когда менее плотная среда выталкивает более плотную). Неустойчивость Рихтмайера-Мешкова (частный случай неустойчивости Рэлея-Тейлора) возникает при нестабильности границ сред с разной плотностью (продукты горения и горючее) при ускорении под воздействием проходящей ударной волны. Неустойчивость Кельвина-Гельмгольца развивается на поверхности пламени, когда поток продуктов горения проходит через узкую часть канала, а сдвиговый слой образуется ниже по потоку от препятствия [10, 13].

Через 0,911 с после поджига скорость фронта пламени достигает скорости звука в смеси. Пламя продолжает ускоряться и через 0,988 с достигает скорости звука в продуктах горения 890 м/с (рис. 12е). Переход горения в детонацию происходит через 1 с после воспламенения смеси, скорость фронта достигает 1400 м/с, затем снижается, и фронт пламени продолжает двигаться со скоростью 1300 м/с (рис. 12ж).

При расчетах турбулентных течений с горением или процессов, проходящих при высокой температуре, важен учет энергии излучения, которая может иметь значительную долю от общего потока энергии [17]. Также необходимы данные об излучении, которые являются исходными для дальнейшего проектирования оптоэлектронной системы контроля нестационарного горения.

В ходе проведения исследований устанавливалось влияние излучения на параметры нестационарного горения. При моделировании с учетом излучения наблюдается отставание фронта пламени на 20 м/с в течение всего времени по сравнению с моделью, не учитывающей излучение. При этом значения скорости фронта пламени, температуры и давления существенно не изменяются, что соответствует результатам, приведенным в литературе [18]: в случае волны

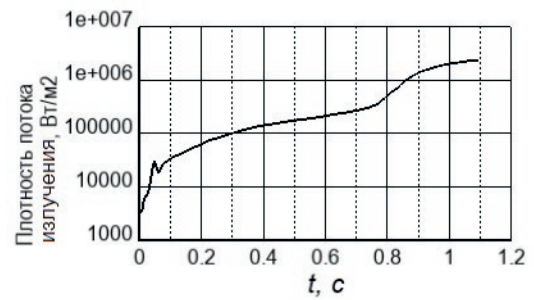


Рисунок 13 – Максимальная плотность потока излучения продуктов горения в расчетной области для модели с параметрами  $D=2$  м,  $S=1.25$  м,  $BR=0.2$   
 Figure 13 – The maximum flux density of the combustion products radiation in the calculated region for the model with parameters  $D = 2$  m,  $S = 1.25$  m,  $BR = 0.2$

горения, распространяющейся от закрытого конца трубы, тепловые потери от излучения продуктов горения практически не оказывают влияния на распространение пламени в газовой смеси.

Результаты расчета максимальной плотности потока излучения продуктов горения в расчетной области для модели с параметрами  $D=2$  м,  $S=1.25$  м,  $BR=0.2$  представлены на рис. 13.

На начальной стадии результаты расчета плотности потока согласуются с теоретическими и экспериментальными данными о плотности потока с поверхности огненных шаров с диаметрами от 0,5 до 10 м – 50-350 кВт/м² [19, 20]. При детонации для метано-воздушных смесей значения плотности потока излучения, приведенные в литературе, лежат в диапазоне от 1000 до 3350 кВт/м² [20]. Полученные расчетные значения плотности потока излучения достигают 2200 кВт/м² и согласуются с экспериментальными данными.

**Заключение**

В результате выполнено моделирование процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах.

Сформулированы аналитические зависимости для выполнения моделирования нестационарного горения метано-воздушной смеси на базе программного комплекса FlowVision.

Таблица 2. Коэффициенты для модели ВССГ при  $p_{H_2O}/p_{CO_2}=2$  [8]  
 Table 2. Coefficients for the BCC model for  $p_{H_2O}/p_{CO_2}=2$  [8]

$i$	$k_p$ (атм·м) <sup>-1</sup>	$b_{i,1}$	$b_{i,2}$ (K <sup>-1</sup> )	$b_{i,3}$ (K <sup>-2</sup> )	$b_{i,4}$ (K <sup>-3</sup> )	$b_{i,5}$ (K <sup>-4</sup> )
1	0.192	$5.62 \cdot 10^{-2}$	$7.84 \cdot 10^{-4}$	$-8.86 \cdot 10^{-7}$	$4.25 \cdot 10^{-10}$	$-7.44 \cdot 10^{-14}$
2	1.719	$1.43 \cdot 10^{-1}$	$1.80 \cdot 10^{-4}$	$-1.08 \cdot 10^{-8}$	$-6.97 \cdot 10^{-11}$	$1.77 \cdot 10^{-14}$
3	11.37	$1.36 \cdot 10^{-1}$	$2.57 \cdot 10^{-4}$	$-3.71 \cdot 10^{-7}$	$1.58 \cdot 10^{-10}$	$-2.27 \cdot 10^{-14}$
4	111.016	$1.22 \cdot 10^{-1}$	$-2.33 \cdot 10^{-5}$	$-7.49 \cdot 10^{-8}$	$4.28 \cdot 10^{-11}$	$-6.61 \cdot 10^{-15}$

Проверена адекватность компьютерной модели на экспериментальных данных, приведенных в литературе для 7 экспериментов, а также на собственных экспериментальных данных. Средняя относительная погрешность модели составляет от 10 до 20 %. Разработанная компьютерная модель является адекватной и применима для расчета параметров нестационарного горения метано-воздушных смесей в трубах с регулярными препятствиями.

Разработанная модель масштабируется на трубы с диаметрами от 2 до 4 м и может быть применима для расчета нестационарного горения для условий угольных шахт.

Проведено моделирование нестационарного горения для условий угольной шахты с учетом геометрии шахты и препятствий. В результате для рассматриваемых конфигураций шахт установлено, что:

- максимальная скорость фронта пламени при детонации достигает 1400 м/с;
  - максимальная температура в расчетной области при детонации составляет 2440 °С;
  - максимальное избыточное давление при детонации составляет 4 МПа;
  - расчетные значения плотности потока излучения при детонации достигают 2200 кВт/м<sup>2</sup>.
- Результаты компьютерного моделирования являются исходными данными для разработки оптико-электронной системы контроля нестационарного горения в угольных шахтах.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00844.**

**The project is fulfilled with financial support of RFFI within the frames of a scientific project No. 17-08-00844**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшова О.Б., Галенко Ю.А., Сыпин Е.В., Тупкина Н.Ю. Детонация реакционноспособных газовых смесей как задача об очаговом тепловом взрыве // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 2. С. 53–58.
2. Лисаков С.А., Сыпин Е.В., Тупкина Н.Ю., Галенко Ю.А. Постановка задачи моделирования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2018. № 1 (Принято в печать).
3. FlowVision. Версия 3.09.04. Руководство пользователя [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8dokumentatsiyafv?download=112:3-09-04-pdf-enu>
4. Маркова Т.В. Развитие моделей горения в ПК flowvision [Электронный ресурс]. Режим доступа: [http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv\\_es12\\_tesis3.pdf](http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es12_tesis3.pdf)
5. Magnussen B.F., and Hjertager B.H. (1976) «On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion,» Sixteenth Symposium (International) on Combustion, pp. 719-729.
6. ANSYS Fluent Theory Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ru.scribd.com/doc/316668483/ANSYS-Fluent-Theory-Guide-pdf>
7. T. F. Smith, Z. F. Shen, and J. N. Friedman. «Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model». J. Heat Transfer. 104. 602–608. 1982.
8. Dorigon L.J., Duciak G., Brittes R., Cassol F., Galarca M., Franca F.H.R. (2013). WSGG correlations based on HITEMP 2010 for computation of thermal radiation in non-isothermal, non-homogeneous H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> mixtures. IJHMT 64, pp. 863–873.
9. D. K. Edwards and R. Matavosian. «Scaling Rules for Total Absorptivity and Emissivity of Gases». J. Heat Transfer. 106. 684–689. 1984.
10. E.S. Oran, V.N. Gamezo, and D.A. Kessler Deflagrations, Detonations, and the Deflagration-to-Detonation Transition in Methane-Air Mixtures, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 2011, 125 p.
11. Сидоренко А.И., Лисаков С.А., Павлов А.Н., Сыпин Е.В., Леонов Г.В. Прикладное моделирование горения углеводородных смесей // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. №1. С. 93-99.
12. Kuznetsov, M., Ciccarelli G., Dorofeev S., Alekseev V., Yankin Yu, and Kim T. H. DDT in Methane-Air Mixtures, Shock Waves, Vol. 12, 2002, pp. 215–220.
13. V. N. Gamezo, R. K. Zipf, Jr., D. A. Kessler, E. S. Oran. DDT in Natural Gas-Air Mixtures on Large Scales: Experiments and Simulations, 24th ICDERS, 2013, Taipei, Taiwan, pp. 1-6.
14. Weiss, E. S., Cashdollar, K. L., Mutton, I. V. S., Kohli, D. R., & Slivensky, W. A. (1999) Evaluation of reinforced cementitious seals (35 pp.). NIOSH RI 9647.
15. Sapko, M. J., Weiss, E. S., & Watson, R. W. (1987b) Size scaling of gas explosions (23 pp.). U.S. Bureau of Mines RI 9136.
16. Васючков Ю. Ф. Горное дело: Учеб. для техникумов. М.: Недра, 1990. 512 с.
17. Юн А.А. Моделирование турбулентных течений. Изд. 2-е, доп. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2010. 352 с
18. Иванов М.Ф., Киверин А.Д., Либерман М.А. Влияние поглощения излучения микрочастицами на скорость пламени и режимы горения // ЖЭТФ. 2015. Т. 148, вып. 1 (7). С. 190–204.
19. Лисаков С.А., Сидоренко А.И., Сыпин Е.В., Павлов А.Н., Леонов Г.В. Компьютерное моделирование излучения пламени при горении метано-воздушных смесей на начальной стадии развития // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2016. № 3. С. 32–41.
20. Hadjipanayis, M.A., Beyrau, F., Lindstedt, R.P., Atkinson, G., Cusco, L. (2015). Thermal Radiation from Vapour Cloud Explosions, Process Safety and Environmental Protection, 94, 517–527.

## REFERENCES

1. Kudriashova, O.B., Galenko, Yu.A., Sypin, Ye.V., & Tupikina, N.Yu. (2017). Detonatsiia reaktsionnosposobnykh gazovykh smesei kak zadacha ob ochagovom teplovom vzryve [Detonation of reactive gas mixtures as a problem of local thermal explosion]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 2, 53-58 [in Russian].
2. Lisakov, S.A., Sypin, Ye.V., Tupikina, N.Yu. & Galenko, Yu.A. (2018). Postanovka zadachi modelirovaniia protsessa nestatsionarnogo goreniia metano-vozdushnoi smesi v ugolnykh shakhtakh [Methane-air mixture nonstationary combustion process in coal mines modeling task statement]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 1 [in Russian].
3. FlowVision. Version 3.09.04. Rukovodstvo polzovatelya [User's manual]. Retrieved from: <https://flowvision.ru/index.php/public-downloads/category/8dokumentatsiyafv?download=112:3-09-04-pdf-enu> [in Russian].
4. Markova, T.V. Razvitiie modeli goreniia v PK flowvision [Combustion model development in flowvision software]. Retrieved from: [http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv\\_es12\\_tesis3.pdf](http://tesis.com.ru/infocenter/downloads/flowvision/fv_es12_tesis3.pdf) [in Russian].
5. Magnussen, B.F., & Hjertager, B.H. (1976) On Mathematical Modelling of Turbulent Combustion with Special Emphasis on Soot Formation and Combustion, *Sixteenth Symposium (International) on Combustion*, pp. 719-729 [in English].
6. ANSYS Fluent Theory Guide. Retrieved from: <https://ru.scribd.com/doc/316668483/ANSYS-Fluent-Theory-Guide-pdf> [in English].
7. Smith, T. F., Shen, Z. F., & Friedman, J. N. Evaluation of Coefficients for the Weighted Sum of Gray Gases Model. *J. Heat Transfer*. 104. 602–608. [in English].
8. Dorigon L.J., Duciak G., Brittes R., Cassol F., Galarca M., & Franca FH.R. (2013). WSGG correlations based on HITEMP 2010 for computation of thermal radiation in non-isothermal, non-homogeneous H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub> mixtures. *IJHMT* 64, pp. 863–873 [in English].
9. Edwards, D. K., & Matavosian, R. (1984) Scaling Rules for Total Absorptivity and Emissivity of Gases. *J. Heat Transfer*. 106. 684–689 [in English].
10. Oran, E.S., Gamezo, V.N., & Kessler, D.A. (2011). *Deflagrations, Detonations, and the Deflagration-to-Detonation Transition in Methane-Air Mixtures*, Naval Research Laboratory, Washington, DC, 125 p. [in English].
11. Sidorenko, A.I., Lisakov, S.A., Pavlov, A.N., Sypin, Ye.V., & Leonov, G.V. (2016). Prikladnoie modelirovaniie goreniia uglevodородnykh smesei [Applied modeling of hydrocarbon mixtures combustion]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 1, 93-99 [in Russian].
12. Kuznetsov, M., Ciccarelli G., Dorofeev S., Alekseev V., Yankin Yu, & Kim T. H. (2002). DDT in Methane-Air Mixtures, *Shock Waves, Vol. 12*, pp. 215–220 [in English].
13. Gamezo, V. N., Zipf Jr., R. K., Kessler, D. A., & Oran, E. S. (2013) DDT in Natural Gas-Air Mixtures on Large Scales: Experiments and Simulations, *24th ICDEERS, Taipei, Taiwan*, pp. 1-6 [in English].
14. Weiss, E. S., Cashdollar, K. L., Mutton, I. V. S., Kohli, D. R., & Slivensky, W. A. (1999) Evaluation of reinforced cementitious seals (35 pp.). *NIOSH RI 9647* [in English].
15. Sapko, M. J., Weiss, E. S., & Watson, R. W. (1987) Size scaling of gas explosions (23 pp.). *U.S. Bureau of Mines RI 9136*.
16. Vasiuchkov, Yu.F. (1990). *Gornoie delo [Mining]*. Moscow: Nedra [in Russian].
17. Yun, A.A. (2010). *Modelirovaniie turbulentnykh techenii [Modeling of turbulent flows]*. Moscow: Knizhny dom "LIBROKOM" [in Russian].
18. Ivanov, M.F., Kiverin, A.D., & Liberman, M.A. (2015). Vliianie pogloshcheniia izlucheniia mikrochastitsami na skorost plameni i rezhimy goreniia [Effect of microparticles radiation absorption on flame velocity and burning conditions]. *JETF*, 148, 1, 190-204 [in Russian].
19. Lisakov, S.A., Sidorenko, A.I., Sypin, Ye.V., Pavlov, A.N., & Leonov, G.V. (2016). Kompiuternoe modelirovanie izlucheniia plameni pri goreniie metano-vozdushnykh smesei na nachalnoi stadii razvitiia [Computer modeling of flame propagation during methane-air mixtures combustion at the initial stage of development]. *Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta – Herald of Voronezh State University*, 3, 32-41 [in Russian].
20. Hadjipanayis, M.A., Beyrau, F., Lindstedt, R.P., Atkinson, G., & Cusco, L. (2015). Thermal Radiation from Vapour Cloud Explosions, *Process Safety and Environmental Protection*, 94, 517–527 [in English].



**Е. А. Петров // Ye. A. Petrov**  
**post@frpc.secna.ru**  
**isf@bti.secna.ru**

профессор, доктор техн. наук, ГНС АО «ФНПЦ «Алтай», декан инженерного спец. факультета Бийского технологического института (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1  
 professor, doctor of technical sciences, STS JSC "FNPTs" Altai", the dean of the engineering special. Faculty of Biysk Technological Institute (branch) FGBOU HPE Altstu, 1, Sotsialisticheskaya Street, Biysk, 659322, Russia



**П. И. Савин // P. I. Savin**  
**post@frpc.secna.ru**  
**rupawel-323@mail.ru**

инженер – технолог 1 категории АО «ФНПЦ «Алтай», 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1  
 engineer - technologist of 1 category JSC "FNPTs" Altai", 1, Sotsialisticheskaya Street, Biysk, 659322, Russia



**Н. П. Вдовина // N. P. Vdovina**  
**post@frpc.secna.ru**

канд. техн. наук, СНС – руководитель группы АО «ФНПЦ «Алтай», 659322, г. Бийск, ул. Социалистическая, 1  
 candidate of technical sciences, SNA - the head of the group of JSC "FNPTs" Altai", 1, Sotsialisticheskaya Street, Biysk, 659322, Russia

УДК 662.221.4

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ИНГИБИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ХИМИЧЕСКУЮ СТОЙКОСТЬ ЭМУЛЬСИОННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В СРЕДЕ ПИРИТА

## INVESTIGATION OF CONCENTRATION INHIBIT ADDITION OF RESISTANCE TO CHEMICALS EMULSION EXPLOSIVES IN A PYRITE

*Более 70 % ассортимента занимают эмульсионные промышленные ВВ. Дынный тип ВВ обладает как широким спектром преимуществ, так и недостатков, например, их ограниченное применение в сульфидных рудах.*

*Целью данной работы являлось, исследование влияния концентрации данных добавок на химическую стойкость эмульсионной матрицы (ЭМ) в среде пирита, а так же оценивалось влияние данных ингибиторов на качество и «живучесть» эмульсионной матрицы.*

*В качестве объекта исследования использовалась несенсибилизированная ЭМ типа «Порэммит» следующего состава: нитрат аммония – 66,5 %, натриевая селитра-14 %, вода-12 %, эмульгатор РЭМ – 2 %, дизельное топливо – 5,5 %. ЭМ имела следующие показатели: плотность – 1,42±0,01 г/см<sup>3</sup>, электрическая емкость – 80-90 пФ.*

*ЭМ смешивалась с пиритом (П) в соотношении 80:20 по массе соответственно. Ингибиторы вводились сверх массы ЭМ от 1 до 3%*

*В работе исследовано влияние концентрации дифениламина, уротропина, мочевины на химическую стойкость эмульсионных взрывчатых веществ в среде пирита.*

*Установлено, что рассмотренные ингибиторы повышают, в зависимости от концентрации, стабильность ЭМ в среде пирита. В равных условиях эксперимента стабилизация достигается (по давлению 20-30 мм рт. ст.) при содержании ингибиторов: для ДФА – 1 %, для У – 2 %, для М ближе к 3 %. При 2 % ДФА стабильность ЭМ в среде пирита практически равна исходной ЭМ в отсутствии пирита.*

*Установлено, что лучшими ингибирующими свойствами обладает дифениламин.*

*Показано, что 2 % дифениламина, уротропина, мочевины не снижают качества и «живучести» эмульсии порэммита.*

*Работа выполнена при поддержке Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (госконтракт №11927ГУ/2017 от 04.07.2017).*

*More than 70% of the assortment is occupied by emulsion industrial explosives. This type BB has both a wide*

range of advantages and disadvantages, for example, their limited use in sulphide ores.

The aim of this work was to investigate the effect of the concentration of these additives on the chemical resistance of the emulsion matrix (EM) in pyrite media, as well as the effect of these inhibitors on the quality and "survivability" of the emulsion matrix.

The non-sensitized EM of the "Poramit" type was used as the research object: ammonium nitrate - 66.5%, sodium nitrate-14%, water-12%, emulsifier SEM - 2%, diesel fuel - 5.5%. EM had the following parameters: density -  $1.42 \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$ , electric capacity - 80-90 pF.

EM was mixed with pyrite (P) in a ratio of 80:20 by weight, respectively. Inhibitors were administered in excess of the EM mass from 1 to 3%.

The effect of the concentration of diphenylamine, urotropine, urea on the chemical resistance of emulsion explosives in pyrite was investigated.

It was found that the inhibitors considered increase the stability of EM in the pyrite medium, depending on the concentration. Under equal experimental conditions, stabilization is achieved (at a pressure of 20-30 mm Hg) with the content of inhibitors: for DPA - 1%, for V - 2%, for M closer to 3%. At 2% DFA, the stability of EM in the pyrite medium is almost equal to the initial EM in the absence of pyrite.

It was found that diphenylamine possesses the best inhibitory properties.

It is shown that 2% of diphenylamine, urotropine, urea does not reduce the quality and "survivability" of the emulsion of pore emit.

This work was supported by the Foundation for Assistance to Small Innovative Enterprises in Science and Technology (State Contract No. 11927U / 2017 of 04.07.2017).

**Ключевые слова:** ЭМУЛЬСИОННОЕ ВВ, ХИМИЧЕСКАЯ СТОЙКОСТЬ, СУЛЬФИДНЫЕ РУДЫ, ПИРИТ, ТЕРМИЧЕСКАЯ СТАБИЛЬНОСТЬ, ИЗОТЕРМИЧЕСКОЕ ТЕМПЕРИРОВАНИЕ, СУЛЬФИДНАЯ РУДА

**Key words:** EMULSION EXPLOSIVES, CHEMICAL RESISTANCE, SULFIDE ORES, PYRITE, THERMAL STABILITY, ISOTHERMAL TEMPERING, SULFIDE ORE

**В** настоящее время для добычи полезных ископаемых промышленность выпускает широкий ассортимент взрывчатых веществ (ВВ). Более 70 % ассортимента занимают эмульсионные промышленные ВВ. Дынный тип ВВ обладает как широким спектром преимуществ, так и недостатков. Одним из недостатков является их ограниченное применение в сульфидных рудах [1].

В работе [2] рассмотрен процесс взаимодействия пирита с аммиачно-селитренными ВВ. Показано, что причиной деструкции эмульсионных ВВ является комплекс параллельно последовательных окислительно-восстановительных реакций, в результате которых, образуется азотная кислота и оксиды азота, катализирующие процесс разложения нитрата аммония, поэтому для стабилизации ВВ необходима их нейтрализация. В работе [3] показано, что эмульсионные ВВ термически и химически более стойки в среде пирита, чем порошкообразные и гранулированные аммиачно-селитренные ВВ.

В работах [4-6] установлено, что лучшее ингибирующее влияние оказывают добавки нейтрализующие продукты разложения азотной кислоты, чем добавки замедляющие её распад. Наиболее эффективные из исследованных веществ, при их содержании в составе 3 % – это дифениламин (ДФА), уротропин (У), мочевины (М).

Целью данной работы являлось, исследо-

вание влияния концентрации данных добавок на химическую стойкость эмульсионной матрицы (ЭМ) в среде пирита, а так же оценивалось влияние данных ингибиторов на качество и «живучесть» эмульсионной матрицы.

В качестве объекта исследования использовалась несенсибилизированная ЭМ типа «Порэммит» следующего состава: нитрат аммония – 66,5 %, натриевая селитра - 14 %, вода - 12 %, эмульгатор РЭМ – 2 %, дизельное топливо – 5,5 %. ЭМ имела следующие показатели: плотность –  $1,42 \pm 0,01 \text{ г/см}^3$ , электрическая емкость – 80-90 нФ.

ЭМ смешивалась с пиритом (П) в соотношении 80:20 по массе соответственно. Ингибиторы вводились сверх массы ЭМ от 1 до 3 %.

Оценка химической стойкости проводилась манометрическим методом на установке «Вулкан» при 30 °С и 50 °С. Данный метод основан на измерении давления газообразных продуктов термического распада веществ в замкнутой реакционной камере первичного преобразователя в изотермическом режиме. Отношение экспериментальной массы к объему реакционной камеры составляло  $0,5 \text{ г/28 см}^3$ . В результате испытаний строились графики зависимости давления образующихся газообразных продуктов от времени эксперимента. Термически стойкими являются составы, в результате термостатирования которых, в течение 24 часов, прекращается рост давления и кривая роста выходит на «плато».

Качество и «живучесть» определялось с помощью температурных нагрузений «тепло-холод». Образцы выдерживались при +80 °С в течение 8 часов, затем при -4 °С в течение 16 часов. После каждого цикла качество эмульсии определялось с помощью электрической емкости. Один цикл соответствует примерно 1 месяцу хранения [1].

На рисунке 1 приведены экспериментальные зависимости давления продуктов разложения исходной ЭМ и ЭМ в смеси с пиритом (ЭМ/П) при 30 °С от времени термостатирования. Полученные данные показали, что ЭМ в присутствии пирита химически и термически нестойкая. Компоненты состава активно взаимодействуют с образованием газообразных продуктов. В течение суток идет непрерывный рост давления и кривая зависимости не выходит на «плато».

На рисунках 2 – 4 приведены результаты манометрических испытаний ЭМ/П с ингибиторами химической стойкости при 50 °С.

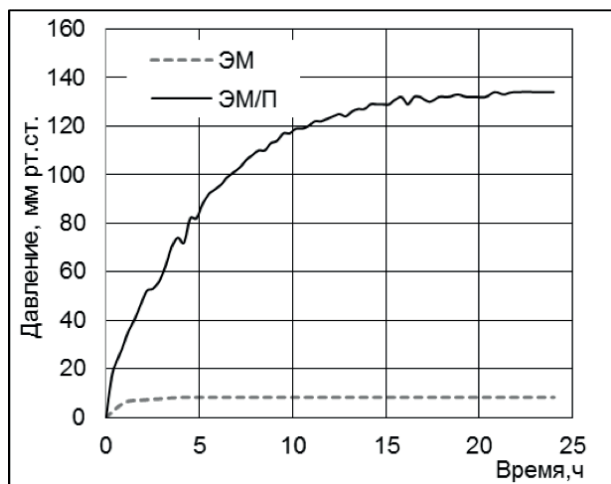


Рисунок 1 – Химическая стойкость ЭМ и ЭМ/П  
Figure 1 - Chemical resistance of EM and EM / P

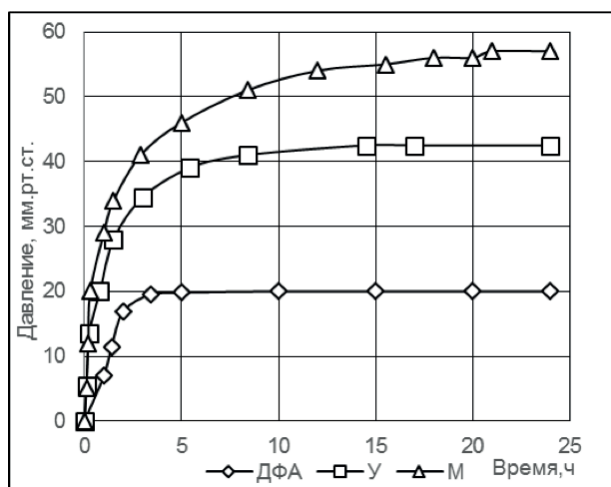


Рисунок 2 – Химическая стойкость ЭМ/П с ингибиторами в количестве 1 %  
Figure 2 - Chemical resistance of EM/P with inhibitors in an amount of 1%

рами химической стойкости при 50 °С.

Исследования показали, что стабилизация ЭМ/П зависит от типа и содержания ингибитора. При 1 % требованиям стабильности удовлетворяют составы с ДФА и У. Давление выходит на «плато» и не превышает 50 мм рт. ст.

При 2-х % содержании ингибитора все составы удовлетворяют требованиям, при этом существенно снизили давление. Лучший результат достигнут на ДФА, где давление, характер роста кривой с ДФА в среде пирита аналогичен исходной ЭМ при 30 °С.

При 3-х % содержании ингибитора все составы так же удовлетворяют требованиям стабильности. По сравнению с 2-х % несколько улучшились результаты по давлению для У, для М практически не улучшились и ухудшились для ДФА, но в последнем случае результаты не хуже, чем для У в аналогичных условиях или для об-

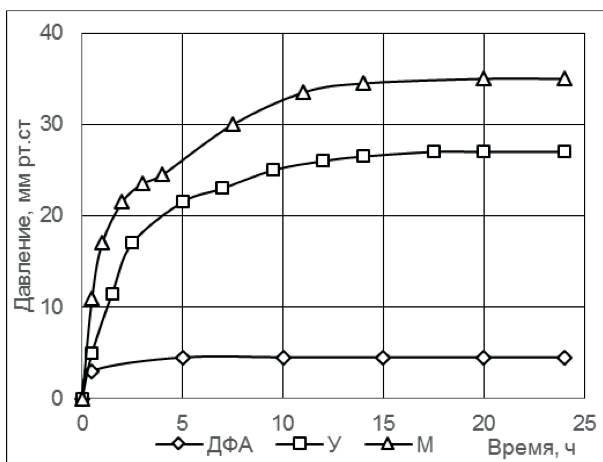


Рисунок 3 – Химическая стойкость ЭМ/П с ингибиторов в количестве 2 %  
Figure 3 - Chemical resistance of EM / P with inhibitors in an amount of 2%

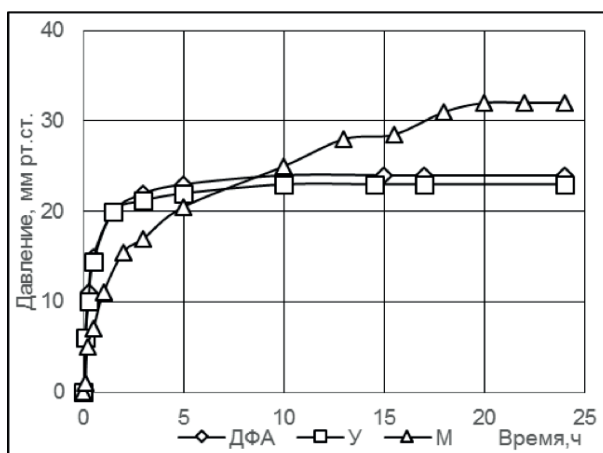


Рисунок 4 – Химическая стойкость ЭМ/П с ингибиторами в количестве 3 %  
Figure 4 - Chemical resistance of EM / P with inhibitors in an amount of 3%



Таблица 1. Качество и «живучесть» ЭМ с 2 % ингибитора  
Table 1. Quality and "vitality" of EM with 2% inhibitor

Кол-во циклов	Электрическая емкость состав, пФ			
	ЭМ	ЭМ/М	ЭМ/У	ЭМ/ДФА
0 цикл	70	69	72	60
1 цикл	70	76	80	85
2цикл	65	78	75	91
3 цикл	65	80	75	82
4 цикл	65	80	75	82
5 цикл	65	75	75	72
6 цикл	65	80	75	95
7 цикл	65	75	68	98
8 цикл	70	75	68	90
9 цикл	75	90	75	100

разца с 1 % ДФА. Это может быть связано, как с природой, так и фазовыми изменениями при нагревании ДФА (температура плавления ДФА составляет 54-55 °С).

Об этом могут свидетельствовать результаты исследования качества и «живучести» ЭМ с добавками ингибиторов в количестве 2 % (таблица 1). В целом ингибиторы не снижают качества, как по сравнению с исходной ЭМ, так и по оценке «живучести», но для образцов ЭМ/ДФА колебания значений электрической емкости от циклов термостатирования более заметны.

Таким образом установлено, что рассматриваемые ингибиторы повышают, в зависимости от концентрации, стабильность ЭМ в среде пирита. В равных условиях эксперимента стаби-

лизация достигается (по давлению 20-30 мм рт. ст.) при содержании ингибиторов: для ДФА – 1 %, для У – 2 %, для М ближе к 3 %. При 2 % ДФА стабильность ЭМ в среде пирита практически равна исходной ЭМ в отсутствии пирита. Показано, что качество и «живучесть» ЭМ не снижается при введении ингибиторов ДФА, У, М в состав порэмита в количестве до 2 % по массе.

**Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №17-08-00844.**

**The project is fulfilled with financial support of RFFI within the frames of a scientific project No. 17-08-00844**

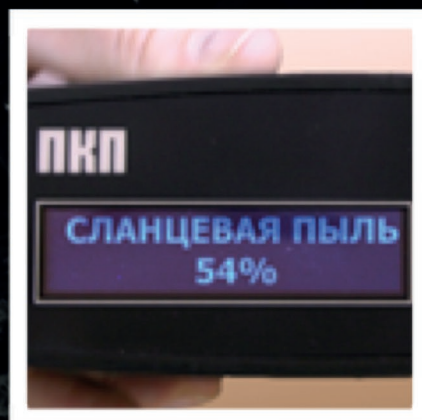
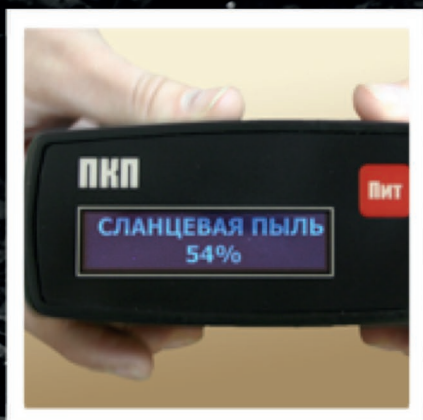
#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колганов, Е.В. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества – 1-я книга (составы и свойства) / Е.В. Колганов, В.А. Соснин. – Дзержинск Нижегородской области ГосНИИ «Кристалл», 2009. – 592 с.
2. Коваленко И.Л., Куприн В.П. Взаимодействие эмульсионных взрывчатых веществ и их компонентов с сульфидными минералами. // Взрывное дело. 2010. – №103/60, – С. 154 – 159
3. Петров Е.А., Савин П.И., Тамбиев П.Г., Бычин Н.В. Исследование термической стабильности аммонита и гранэмита в сульфидных рудах. // Горный журнал Казахстана. – 2014. – № 4. – С. 18 – 22.
4. Петров Е.А., Савин П.И., Тамбиев П.Г., Бычин Н.В. Исследование влияния стабилизирующих добавок на термическое разложение эмульсионного взрывчатого вещества в среде пирита. // Горный журнал Казахстана. – 2016. – № 1. – С. 18 – 21.
5. Савин П.И., Петров Е.А., Тамбиев П.Г. Бычин Н.В. Исследование влияния стабилизирующих добавок на химическую стабильность эмульсионных ВВ в сульфидных рудах. // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: материалы X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием/ Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2017. – С. 64-68. – 536 с.
6. Петров Е.А., Савин П.И. Влияние мочевины на термическую стабильность аммиачно-селитренных взрывчатых веществ в сульфидных средах / Е.А. Петров, П.И. Савин // Вестник научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. – 2014. – № 1. – С.158 – 160.

#### REFERENCES

1. Kolganov, E. V., & Sosnin, V. A. (2009). *Emul'sionnyye promyshlennyye vzryvchatyye veshchestva – 1-ya kniga (sostavy i svoystva)* [Emulsion Industrial Explosives - Book 1 (Compositions and Properties)]. Dzerzhinsk: Nizhny Novgorod region GosNII "Kristall". [In Russian].

2. Kovalenko, I. L., & Kuprin, V. P. (2010). Vzaimodeystviye emul'sionnykh vzryvchatykh veshchestv i ikh komponentov s sul'fidnymi mineralami [Interaction of emulsion explosives and their components with sulphide minerals]. *Vzryvnoye Delo - Explosive Case*, 103(60), 154-159. [In Russian].
3. Petrov, E. A., Savin, P. I., Tambiyev, P. G., & Bychin, N. V. (2014). Issledovaniye termicheskoy stabil'nosti ammonita i granemita v sul'fidnykh rudakh [Investigation of the thermal stability of ammonite and granite in sulphide ores]. *Gornyy Zhurnal Kazakhstana - Kazakhstan Mining Journal*, (4), 18-22. [In Russian].
4. Petrov, E. A., Savin, P. I., Tambiyev, P. G., & Bychin, N. V. (2016). Ssledovaniye vliyaniya stabiliziruyushchikh dobavok na termicheskoye razlozheniye emul'sionnogo vzryvchatogo veshchestva v srede pirita [Investigation of the effect of stabilizing additives on the thermal decomposition of an emulsion explosive in pyrite]. *Gornyy Zhurnal Kazakhstana - Kazakhstan Mining Journal*, (1), 18-21. [In Russian].
5. Savin, P. I., Petrov, E. A., Tambiyev, P. G., & Bychin, N. V. (2018). Technologies and equipment of chemical, biotechnological and food industry: Materials of the X All-Russian scientific-practical conference of students, graduate students and young scientists with international participation. *Issledovaniye vliyaniya stabiliziruyushchikh dobavok na khimicheskuyu stabil'nost' emul'sionnykh VV v sul'fidnykh rudakh [Investigation of the influence of stabilizing additives on the chemical stability of emulsion explosives in sulphide ores]* (pp. 64-68). Biysk: Publishing house of the Altai State Technical University. [In Russian].
6. Petrov, E. A., & Savin, P. I. (2014). Vliyaniye mocheviny na termicheskuyu stabil'nost' ammiachno-selitrennykh vzryvchatykh veshchestv v sul'fidnykh sredakh [Effect of urea on the thermal stability of ammonia-nitrate explosives in sulphide media]. *Vestnik Nauchnogo Tsentra Po Bezopasnosti Rabot v Ugol'noy Promyshlennosti - Industrial Safety*, (1), 158-160. [In Russian].



indsafe.ru

**ПКП**

**ПРИБОР КОНТРОЛЯ ПЫЛЕВЗРЫВОБЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК**

на правах рекламы



**А. И. Фомин // A. I. Fomin**  
ncvostnii@yandex.ru

д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела АО «НЦ ВостНИИ», Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3  
doctor of technical sciences, department leading scientific researcher, JSC «ScS VostNIi», 3, Institutskaya Street, Kemerovo, 650002, Russia



**Ю. А. Фадеев // Yu. A. Fadeev**  
uaf49@yandex.ru

д-р физ.-мат. наук профессор ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева», Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
doctor of physico-mathematical sciences, professor of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), 28, Vesennaya Street, Kemerovo, 650000, Russia



**И. М. Анисимов // I.M. Anisimov**  
ilja\_anisimov@rambler.ru,

аспирант ФГБОУ ВО «КузГТУ им. Т. Ф. Горбачева», Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28  
postgraduate student of of T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University (KuzSTU), 28, Vesennaya Street, Kemerovo, 650000, Russia

УДК 613.62

## ИССЛЕДОВАНИЯ ЭТАПОВ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ У РАБОТНИКОВ, ЗАНЯТЫХ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССАХ ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ОТКРЫТЫМ СПОСОБОМ

## WORKERS EMPLOYED IN TECHNOLOGICAL PROCESSES OF OPEN CAST MINING OCCUPATIONAL DISEASES FORMATION STAGES RESEARCH

*В статье рассмотрены вопросы сохранения здоровья работников, продолжения их профессиональной активности и долголетия, улучшения демографической ситуации страны.*

*Отмечено значение открытой разработки угольных месторождений Кузбасса, ее вклад в общие объемы добычи угля в регионе, указана дальнейшая перспектива.*

*В то же время профессиональные заболевания приносят существенный экономический ущерб, снижают технико-экономические показатели предприятий по добыче угля открытым способом, приводят к росту дефицита людских ресурсов.*

*Снижение риска формирования профессиональных заболеваний работников ведущих профессий при разработке угольных месторождений открытым способом связано с высоким уровнем заболеваний, вызванных производственными факторами, является актуальной проблемой, замедляющей развитие экономики, вызывая экономические потери предприятий, угольных компаний и государства в целом.*

*Высокие уровни общей и профессиональной заболеваемости работников угольной отрасли Кузбасса являются результатом вредного воздействия неблагоприятных условий труда на здоровье и жизнь горняков. Указаны основные вредные производственные факторы – это прежде всего физические факторы. Кроме того, на предприятиях угольной отрасли отмечаются высокие показатели тяжести и напряженности (класс 3.1 – 3.3) у работников рабочих профессий и специалистов среднего звена. Неблагоприятный режим работы (12-ти часовой) приводит к полторакратной сменной нагрузке комплексного воздействия вредных и опасных производственных факторов, превышающих гигиенические нормативы, рассчитанные на 8-часовую смену.*

*Проведен детальный анализа данной проблемы, изучены материалы расследования профессиональных заболеваний за 2015 и 2016 годы по Кемеровской области, возникших у работников, трудовая деятельность которых была связана с разработкой угольных месторождений открытым способом. С помощью «Карт учета» было изучено более 100 случаев профессиональных заболеваний.*

*Представлены расчеты распределения случаев профессиональных заболеваний по стажу работы с ВПФ и по возрасту, внесены предложения по своевременному выявлению и снижению риска профза-*

*болеваній работников угольных разрезов. .*

*The article considers the issues of preserving the health of employees, their professional activity continuation and their longevity, and the country demographic situation improvement.*

*The importance of Kuzbass coal deposits open cast development, its contribution to the overall coal production in the region are marked, and its further perspective is indicated.*

*At the same time, occupational diseases cause significant economic damage, reduce the technical and economic performance of open-cast coal-mining enterprises, lead to an increase in the scarcity of human resources.*

*Leading profession employees occupational diseases formation risk reduction at the coal deposits open cast development is associated with a high level of diseases caused by production factors, is an urgent problem slowing the development of the economy, causing economic losses to enterprises, coal companies and the state as a whole.*

*Kuzbass coal industry employees high levels of general and occupational morbidity are the result of unfavorable working harmful conditions effect on the health and life of miners. The main harmful production factors are indicated, first of all, physical factors. In addition, at the coal industry enterprises there are high indicators of severity and tension (class 3.1 - 3.3) among employees of working professions and middle-level specialists. Unfavorable mode of operation (12 hours) leads to a 1.5-fold shift load of the combined effect of harmful and dangerous production factors exceeding the hygienic standards calculated for an 8-hour shift.*

*A detailed analysis of this problem was carried out, Kemerovo region occupational diseases which arose among workers whose work activities were related to the coal deposits open cast method development investigation materials for the years 2015 and 2016, were studied. More than 100 cases of occupational diseases were studied with the help of "Registration cards".*

*Occupational diseases distribution cases calculations according to the length of service with the VPF (harmful industrial factors) and age are presented, suggestions are made for the timely detection and open cast coal mines workers occupational diseases risk reduction.*

**Ключевые слова:** УГОЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ, ОТКРЫТАЯ РАЗРАБОТКА УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ, ВРЕДНЫЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ФАКТОРЫ, ЭТАПЫ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ЗАБОЛЕВАНИЯ

**Key words:** COAL INDUSTRY, COAL DEPOSIT OPEN CAST MINING, HARMFUL INDUSTRIAL FACTORS, OCCUPATIONAL DESEASE FORMATION STAGES

Оптимальный рост экономического потенциала страны зависит от состояния здоровья работников, их профессиональной активности и долголетия. «Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года» [1] сформировала первоочередные задачи демографической политики и политики народосбережения, связанных с разработкой и реализацией мероприятий различного уровня по улучшению условий и охраны труда, совершенствованием медико-профилактического обеспечения работников.

Профессиональные заболевания и производственный травматизм приносят существенный экономический ущерб, снижают технико-экономические показатели предприятий, приводят к росту дефицита людских ресурсов, ухудшают экономический потенциал страны. Экономика России по причине заболеваемости работников ежегодно теряет около 560 млн. человеко-дней. До 40 % трудовых потерь на производстве обусловлено заболеваниями, прямо или косвенно связанными с условиями труда.

Снижение риска формирования профессиональных заболеваний работников ведущих профессий при разработке угольных месторождений открытым способом связано с высоким уровнем заболеваний, вызванных производственными факторами, является актуальной проблемой, замедляющей развитие экономики, вызывая экономические потери предприятий, угольных компаний и государства в целом.

Во многих странах посредством эпидемиологических обзоров и исследований профессиональные риски постоянно изменяются, при этом расширяются знания о профессиональных заболеваниях, что влечет за собой необходимость в изменении и дополнении списка профессиональной заболеваемости, отражая настоящее положение дел в области знаний, для удовлетворения нужд, пострадавших от данных заболеваний [2].

Следует отметить, что, если до 1997 года основная доля добычи угля в Кузбассе приходилась на подземную добычу, то начиная с 1997 года (общая добыча – 93,9 млн. тонн, в т. ч. открытая добыча – 48 млн. тонн) идет устойчивое

наращивание объемов добычи угля открытым способом, и эта тенденция продолжается. Так, в 2017 году при общей добыче угля в Кузбассе в объеме 241,5 млн. тонн – 156,6 млн. тонн добыто открытым способом, не допустив, при этом, ни одного случая травмирования работников со смертельным исходом.

По уровню профессиональной заболеваемости Кемеровская область более 10 лет занимает первое место, в 7–8 раз превышая общероссийский показатель. В угольной промышленности Кузбасса профессиональные заболевания имеют 90 работников из 10 тысяч занятых в производстве.

Высокие уровни общей и профессиональной заболеваемости работников угольной отрасли Кузбасса являются результатом вредного воздействия неблагоприятных условий труда на здоровье и жизнь горняков. Прежде всего, это физические факторы. Кроме того, на предприятиях угольной отрасли отмечаются высокие показатели тяжести и напряженности (класс 3.1 – 3.3) у работников рабочих профессий и специалистов среднего звена. Если уровень функционального напряжения чрезмерно велик и перегрузки продолжаются длительное время, то происходят патологические изменения в органах и тканях на клеточном уровне. Перенапряжение является фактором профессионального риска возникновения и развития профессиональных заболеваний: нервной и сердечно-сосудистой системы, обмена веществ, снижается активность иммунной системы. Увеличивают риск развития заболеваний тяжесть, психоэмоциональная напряженность и монотонность труда, неправильное питание.

На предприятиях, ведущих добычу угля открытым способом, за 2015 год установлены профессиональные заболевания у 62 водителей технологического транспорта, у 49 машинистов экскаватора, у 26 машинистов буровых установок, у 17 машинистов бульдозера. Всего в угольной отрасли Кемеровской области в 2015 году впервые выявлено 900 случаев профессиональных заболеваний.

Большинство заболеваний, травм работающих людей многофакторны. Базовые доказательства роли различных факторов риска на общее состояние здоровья работающих людей при разработке мер профилактики часто недостаточно используются. Большинство исследований фокусируются на одном факторе риска. Существует определенная связь факторов профессиональных рисков с профессиональными заболеваниями и травматизмом. Личностные

факторы риска, такие как генетика, возраст, пол, хронические заболевания, ожирение, курение, употребление алкоголя и наркотиков, играют так же немаловажную роль. Так работа по сменам может быть связана с более высокими темпами ожирения или курения, или употребления лекарств, что может взаимодействовать с воздействием химических веществ на рабочем месте и влиять на различные системы органов [3].

На предприятиях угольной промышленности воздух рабочей зоны загрязнен пылью и аэрозолями со значительным превышением гигиенических нормативов. При выполнении горных работ открытым способом добычи угля также на рабочих местах работников ведущих профессий (машинист экскаватора, бульдозера, бурового станка, водитель технологического транспорта и др.) преобладают повышенные уровни шума и вибрации, инфразвука, неблагоприятный микроклимат. Усугубляющим фактором развития профессиональной патологии на открытых горных работах является прежде всего неблагоприятный режим работы (12-ти часовой), который приводит к полуторакратной сменной нагрузке комплексного воздействия вредных и опасных производственных факторов, превышающих гигиенические нормативы, рассчитанные на 8-часовую смену и отсутствие профилактики.

Не выдерживается основной принцип – соблюдение гигиенических ПДК и ПДУ, недостижимых пока для угольной отрасли при современной технологии угледобычи. Система не учитывает факторы риска развития профессионального заболевания, позволяющие установить дозо-временную зависимость и использовать принцип защиты временем путем утверждения режимов труда и отдыха в процессе работы.

Внедрение новейшей горной техники и технологий, биологических и химических веществ, различных видов энергии и проникающих излучений приводит к наличию (увеличению) опасных и вредных производственных факторов, увеличивает профессиональные риски [4].

Проблема профессиональной заболеваемости является ключевой при современных методах механизации и способах разработки угольных месторождений открытым способом. Рабочие места машинистов тяжелых карьерных машин являются лишь на первый взгляд удобными и комфортабельными. Даже в случае максимального исключения рисков, связанных с внешними неблагоприятными условиями работы в очистном забое и на транспортных участках, сама эргономическая модель человек-машина несет в себе не малый спектр неблагоприятных

воздействий на функционирование организма в целом.

В современных рыночных условиях необходимость своевременного диагностирования и предотвращения формирования профессионального заболевания, является одним из приоритетных элементов организации системы управления охраной труда. В свою очередь, такая отрасль как добыча угля открытым способом имеет высокий уровень механизации. Соответственно, снижение действия вредного производственного фактора представляет собой достаточно сложную организационную задачу. Рабочие места машинистов тяжелых карьерных машин в случае максимального исключения рисков, связанных с внешними неблагоприятными условиями работы в очистном забое и на транспортных участках, являются весьма неблагоприятными. Сама эргономическая модель человек-машина несет в себе немалый спектр неблагоприятных воздействий на функционирование организма в целом.

Для детального анализа данной проблемы изучены материалы расследования профессиональных заболеваний за 2015 и 2016 годы по Кемеровской области, возникших у работников, трудовая деятельность которых была связана с разработкой угольных месторождений открытым способом. С помощью «Карт учета» было изучено более 100 случаев профессиональных заболеваний [1].

На основании проведенного исследования, были выделены ключевые закономерности в природе формирования профессиональных заболеваний. Обозначены вредные производственные факторы являющиеся значимыми при образовании будущих патологий. К наиболее значительным факторам риска следует отнести шум, вибрацию, токсичные вещества, образованные в результате промышленных взрывов, угольно-породные аэрозоли [5,6,7]. Тяжесть трудового процесса, обусловленная вибрацией и шумом из-за несовершенства горной техники, а также внешние неблагоприятные природные и экологические факторы непосредственно оказывают воздействие на психологическую устойчивость персонала [5,7].

С целью снижения негативного влияния на выборку внешних факторов, не обусловленных природой заболеваний, из массива данных были исключены случаи самостоятельных обращений работников в медицинские учреждения. За счет этого, массив данных опирается на результаты регулярных медицинских осмотров в соответствии с требованиями нормативно правовых ак-

тов РФ.

Для построения графика распределений частоты случаев и стажа с вредными производственными факторами (ВПФ) необходимо сгруппировать количество установленных за пятилетний период фактов профессиональных заболеваний. На основании полученных в результате проведенных исследований данных, построен график распределения изображенный на рисунке 2. На данном графике так же отображен доверительный интервал, установленный на основании обработанного массива данных, равный 1,96 случая профессионального заболевания при заданном уровне значимости в 10 %.

Сложная форма распределения, представленная асимметричной кривой, обусловлена перекрыванием нескольких симметричных кривых распределения.

Графическое представление различных процессов предполагает дальнейший анализ плоской кривой с целью получения дополнительной информации. К сожалению, полученные экспериментально кривые распределения обладают в большинстве случаев неразрешенной внутренней структурой, имеют достаточно сложную форму и поэтому их невозможно выразить простой функциональной зависимостью. Предполагается, что сложная плоская кривая представляет собой суперпозицию небольшого числа симметричных кривых. Разложение сложной кривой на составляющие компоненты является сложной многопараметровой задачей, решаемой в различных областях, таких как оптика, прикладная спектроскопия, радиоэлектроники, акустики и т.д. Применение вычислительной техники, использование метода генетического алгоритма, симплекс метода, Фурье-анализа, также не даёт однозначного решения. Установление числа перекрывающихся компонент, образующих сложный контур распределения, является весьма важной проблемой, так как от этого зависит результат разложения. Вывод в правильности решения задачи основан, главным образом, рассмотрением той модели процесса, которая соответствует реальности и в наибольшей степени определяется совпадением результатов, полученных при проведении исследований различными методами. В данной работе были использованы методы анализа сложного контура, заимствованные из методики анализа сложных кривых в прикладной спектроскопии [8].

При разложении сложной кривой на составляющие компоненты будем исходить из нескольких положений. Во-первых, любая симметричная кривая теоретически имеет беско-

нечно протяженные «крылья» по обе стороны от максимума. В экспериментальной спектроскопии такие кривые ограничивают протяженность «крыльев» до десяти значений полуширин составляющих спектральных полос [9]. Во-вторых, очевидно, что каждая компонента сложного контура, должна описываться одной и той же функциональной зависимостью. Другими словами, компоненты должны соответствовать какой-либо одной форме: лоренцевой, гауссовой или иной кривой. Необходимо отметить, что вид кривой зависит от координат, в которых приведена рассматриваемая кривая. Предполагаем, что при изменении условий эксперимента на выбранном интервале будет изменяться только интенсивность компонент, но остается неизменной их форма. Как известно асимметричные контуры полос характеризуются нечетными моментами [10]. При анализе величин моментов делается вывод о том, к какой форме контура ближе всего соответствует контур наблюдаемой кривой. Однако, применение метода моментов весьма затруднительно в случае сильной асимметрии контура, так как понятие полуширины полосы соответствует в большей степени симметричному контуру. В этом случае коэффициент асимметрии, на наш взгляд, должен определяться по другой методике.

Рассмотрим в качестве примера несимметричную форму контура с некоторым приближением к лоренцевой форме. Согласно [8] усеченные моменты  $r$ -ой степени определяются следующим выражением:

$$\mu_r(j) = \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\Delta\nu_{1/2}\right)^r} \frac{\int_{-j}^j (\nu - \nu_0)^r F(\nu) d\nu}{\int_{-j}^j F(\nu) d\nu}$$

Где  $F(\nu)$  – значение функции при заданном значении  $\nu$ ;  $\nu_0$  – положение максимума кривой,  $(\frac{1}{2}\Delta\nu_{1/2})$  – значение её полуширины (Рисунок 1). Моменты измеряются по последовательным равноудаленным расстояниям от центра кривой и выражаются в единицах  $j$ , где:

$$j = \frac{\nu - \nu_0}{\frac{1}{2}\Delta\nu_{1/2}}$$

Ширину контура, задаваемого функцией, будем измерять слева и справа от линии симметрии, опущенной из максимума на базовую линию (рисунок 2). При несимметричном контуре значения  $\nu - \nu_0$ , (где  $\nu_0 = 31 - 35 \text{ лет}$  – положение максимума) будут различными. В этом случае выражение, например для третьего момента  $j=3$ , можно разбить на две части:

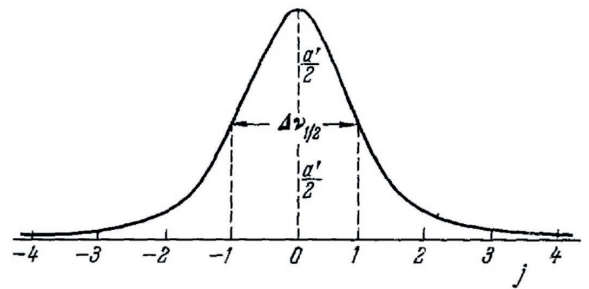


Рисунок 1 - Кривая распределения с абсциссой в единицах  $j$   
Figure 1 - Distribution curve with abscissa in units of  $j$

$$\mu_3(j) = \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\Delta\nu_{1/2}\right)^r} \frac{\int_{-j}^{+j} (\nu - \nu_0)^r F(\nu) d\nu}{\int_{-j}^{+j} F(\nu) d\nu} + \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\Delta\nu_{1/2}\right)^r} \frac{\int_{-j}^0 (\nu - \nu_0)^r F(\nu) d\nu}{\int_{-j}^0 F(\nu) d\nu} + \frac{1}{\left(\frac{1}{2}\Delta\nu_{1/2}\right)^r} \frac{\int_0^{+j} (\nu - \nu_0)^r F(\nu) d\nu}{\int_0^{+j} F(\nu) d\nu}$$

Данное выражение представляет собой разделение контура на две составляющие, которые соответствуют интегральным интенсивностям левой и правой части кривой (рисунок 3). Отношение второго слагаемого к первому задаётся некоторым коэффициентом  $R$ , который выражает «степень асимметрии» контура. Очевидно, что в случае симметричного контура этот коэффициент будет равен 1. Чем меньше значение коэффициента, тем значительнее асимметрия и соответственно тем значительнее расхождение между максимумами компонент.

$$R = \frac{\frac{\int_0^{+j} (\nu - \nu_0)^r F(\nu) d\nu}{\left(\frac{1}{2}\Delta\nu_{1/2}\right)^r \int_0^{+j} F(\nu) d\nu}}{\frac{\int_{-j}^0 (\nu - \nu_0)^r F(\nu) d\nu}{\left(\frac{1}{2}\Delta\nu_{1/2}\right)^r \int_{-j}^0 F(\nu) d\nu}}$$

Представленное значение коэффициента  $R$  в рассматриваемом случае, необходимо определить графическим методом, а именно соотношением площадей образованных контурами  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$  и осью  $\nu$  (Рисунок 3). Коэффициент асимметрии равен 0,266 ( $R=0,266$ ).

Рассмотрим применение данной методики непосредственно к полученной кривой распределения, представленной на рисунке 2. Первое распределение имеет пик в районе 28 лет, второе в свою очередь в районе 34 лет.

Первое распределение обусловлено внешним фактором, который ослабляется к 28 годам и в дальнейшем зависимость имеет нисходящую тенденцию. Ввиду того, что темпы развития профессиональных заболеваний по данному распределению скудны на динамику, есть возможность предположить, что эта характери-

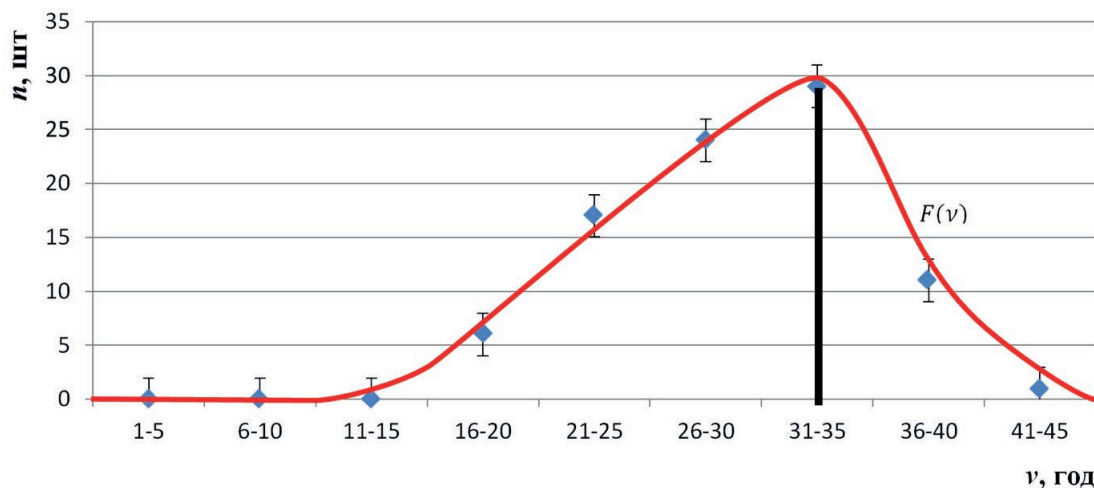


Рисунок 2 - Распределение случаев установления профессиональных заболеваний к стажу с ВПФ  
 Figure 2 - Distribution of cases of establishment of occupational diseases for length of service with VFR

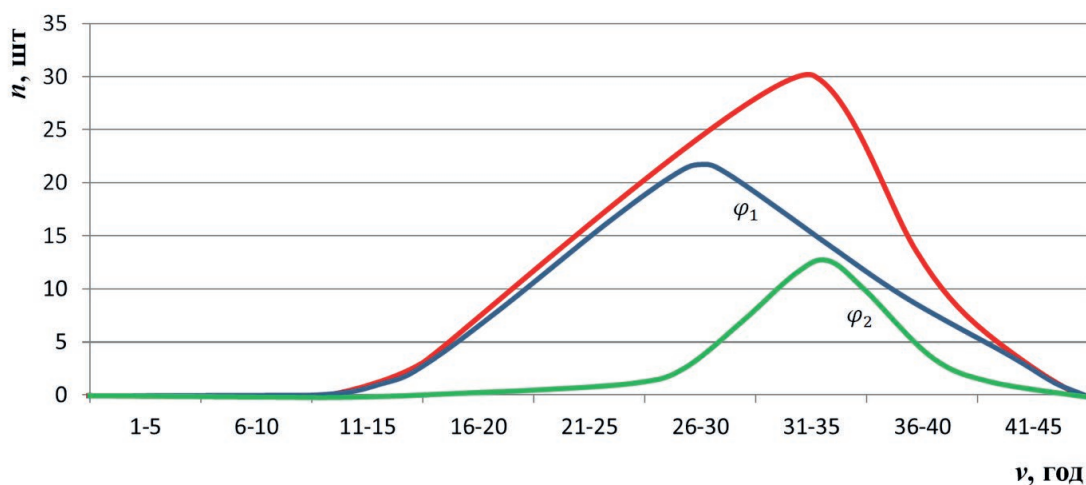


Рисунок 3 - Составные части распределение количества профзаболеваний к возрасту  
 Figure 3 - Components of the distribution of the number of occupational diseases by age

стика представляет собой естественную смену кадрового состава. Пик в 28 лет стажа является в тоже время показательным с точки зрения ухода на досрочную пенсию за тяжелые условия труда [11].

Второе распределение представляет собой фактор отягощения, резко возрастающей нагрузки на организм и здоровье работника уже и так ослабленного под действием вредных факторов в первый период. В данном случае, продолжение участия в трудовой деятельности в тяжелых условиях труда способствует продолжительному росту количества профессиональных заболеваний до момента наступления

возраста выхода на пенсионное обеспечение на общих основаниях или же развитию стойкой утраты трудоспособности и прекращению трудовой деятельности в дальнейшем.

Для определения доли профессиональных заболеваний, приходящихся на сформированные после наступления досрочного пенсионного обеспечение, необходимо вернуться ко всем случаям профессиональных заболеваний, и выделить из них долю работающих со стажем более 28 лет при воздействии вредных производственных факторов. Данные представлены в таблице 1.

Оценивая полученные данные (таблица

Таблица 1. Процент профессиональных заболеваний, сформированных после выхода на досрочное пенсионное обеспечение

Table 1. Percentage of occupational diseases formed after reaching early retirement provision

До выхода на досрочное пенсионное обеспечение	После выхода на досрочное пенсионное обеспечение
44%	56%



1), необходимо уделить особое внимание прекращению выполнению работ в тяжелых условиях труда по выходу на досрочное пенсионное обеспечение. Так же, ввиду того что исследованию подвергались работники, проходящие периодические медицинские осмотры, исключен дополнительный внешний фактор, увеличивающий количество выявляемых профессиональных заболеваний по завершению профессиональной трудовой деятельности, это дополнительно подтверждает реальную возможность исключения второй составляющей из общего распределения профессиональных заболеваний.

В заключение отметим, что полученные результаты довольно хорошо согласуются с выводами, сделанными в работе [5]. В ней отмечалось, что возрастные изменения, отражающиеся на состоянии нервной системы работников в горных отраслях промышленности, наблюдаются именно в период достижения 25-30 летнего

стажа работы. В частности, у работников в возрасте 50-55 лет наблюдаются процессы снижения стрессоустойчивости, способности быстрого нахождения оптимальных решений производственных задач в чрезвычайных условиях.

На основании полученной зависимости имеется возможность анализа вероятности формирования профессионального заболевания у работников, занятых на рабочих местах с заведомо высоким уровнем профессионального риска. Это так же позволяет вести более глубокий контроль за физиологическим состоянием работника, стаж работы которого с вредным производственным фактором достигает отметки повышенной вероятности выявления профессионального заболевания, вследствие чего имеет смысл индивидуально разрабатывать дополнительные корректирующие мероприятия, направленные на защиту работника от негативного влияния ВПФ.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. Распоряжение Правительства Российской Федерации от 17.11.2008 г. № 1662-р.
2. New risks and trends in the safety and health of women at work / Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. ISBN: 978-92-9240-153-5. doi: 10.2802/69206 European Agency for Safety and Health at Work - EU-OSHA, 2013.
3. Interaction of Occupational and Personal Risk Factors in Workforce Health and Safety / Paul A. Schulte, PhD, SudhaPandalai, MD, Victoria Wulsin, MD, and HeeKyoung Chun, ScD/ Am J Public Health. 2012 March; 102(3): 434-448.
4. Onder, S., Evaluation of occupational injuries with lost days among opencast coal mine workers through logistic regression models. *SafetyScience*, 59, pp. 86-92, 2013.
5. Риск формирования профессиональных заболеваний при разработке угольных месторождений открытым способом / Фомин А.И., Соболев В.В., Сазонов М.С., Анисимов И.М., Малышева М.Н.// *Безопасность труда в промышленности*. – 2017. – № 10. – С. 65-71.
6. Обзор состояния профессиональной заболеваемости работников угольной промышленности Кемеровской области, и концепция мировой законодательской деятельности по выявлению и учету профессиональных заболеваний / Фомин А.И., Малышева М.Н., Анисимов И. М., Соболев В.В., Сазонов М.С. // *Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности – Кемерово* – 2017 – № 2 – С. 63 – 71.
7. Техногенный экологический риск и метрологическое обеспечение качества нефтепродукта / Айжамбаева С.Ж., Невзоров Б.П., Слимова А.Е., Фадеев Ю.А.// *Вестник КемГУ* – 2017 – № 2(2). – С. 67-73.
8. Анализ психологической устойчивости сотрудников МЧС стандартизированным многофакторным методом исследования личности (СМИЛ) / Николовская Н.А., Невзоров Б.П., Фадеев Ю.А. // *Вестник КемГУ*. – 2016 – №2 (66) С.131-135.
9. Разделение сложных спектров на индивидуальные полосы при помощи обобщенного метода Аленцева / Фок М.В // *Тр. Физического института Академии наук СССР* – 1972 – Т.59. – С. 3-24.
10. Электрические и оптические свойства кристаллов / Фадеев Ю.А., Демьянов В.В. // *ГУ КузГТУ*. – Кемерово – 2003. – 108 с.
11. Форма и интенсивность инфракрасных полос поглощения / Сешадри К., Джонс Р.// *УФН*, . – 1965. – Т.85 – Вып.1. – С. 87-145.

### REFERENCES

1. *Rasporyazheniye Pravitel'stva Rossiyskoy Federatsii ot 17.11.2008 g. № 1662-r. Order of the Government of the Russian Federation of 17.11.2008 № 1662-r. Kontseptsiya dolgosrochnogo sotsial'no-ekonomicheskogo razvitiya Rossiyskoy Federatsii na period do 2020 goda [Order of the Government of the Russian Federation of 17.11.2008 № 1662-r.. The concept of long-term socio-economic development of the Russian Federation for the period until 2020]. (2008). Moscow. [In Russian]*
2. *New risks and trends in the safety and health of women at work.* (2013). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. European Agency for Safety and Health at Work doi: 10.2802/69206
3. Schulte, P. A., Pandalai, S., Wulsin, V., & Chun, H. (2012). Interaction of Occupational and Personal Risk Factors in Workforce Health and Safety. *American Journal of Public Health*, 102(3), 434-448. doi:10.2105/ajph.2011.300249
4. Onder, S. (2013), Evaluation of occupational injuries with lost days among opencast coal mine workers through logistic regression models. *SafetyScience*, 59, 86-92.

5. Риск формирования профессиональных заболеваний при разработке угольных месторождений открытым способом / Фомин А.И., Соболев В.В., Сазонов М.С., Анисимов И.М., Малышева М.Н.// Безопасность труда в промышленности. – 2017. – № 10. – С. 65-71.
6. Обзор состояния профессиональной заболеваемости работников угольной промышленности Кемеровской области, и концепция мировой законодательной деятельности по выявлению и учету профессиональных заболеваний / Фомин А.И., Малышева М.Н., Анисимов И. М., Соболев В.В., Сазонов М.С. // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности – Кемерово – 2017 – № 2 – С. 63 – 71.
7. Техногенный экологический риск и метрологическое обеспечение качества нефтепродукта ./ Айжамбаева С.Ж., Невзоров Б.П., Слимova А.Е., Фадеев Ю.А.// Вестник КемГУ – 2017 – № 2(2). – С. 67-73.
8. Анализ психологической устойчивости сотрудников МЧС стандартизированным многофакторным методом исследования личности (СМИЛ) / Николовская Н.А., Невзоров Б.П., Фадеев Ю.А. // Вестник КемГУ. – 2016 – №2 (66) С.131-135.
9. Разделение сложных спектров на индивидуальные полосы при помощи обобщенного метода Аленцева / Фок М.В // Тр. Физического института Академии наук СССР. – 1972 – Т.59. – С. 3-24.
10. Электрические и оптические свойства кристаллов / Фадеев Ю.А., Демьянов В.В. // ГУ КузГТУ. – Кемерово – 2003. – 108 с.
11. Форма и интенсивность инфракрасных полос поглощения / Сешадри К., Джонс Р.// УФН, . – 1965. – Т.85 – Вып.1. – С. 87-145.



indsafe.ru

# PKA-01

ПРИБОР КОНТРОЛЯ ЗАПЫЛЕННОСТИ ВОЗДУХА

на правах реклам



**А. И. Фомин // A. I. Fomin**  
ncvostnii@yandex.ru

д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела АО «НЦ ВостНИИ», Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3  
doctor of technical sciences, department leading scientific researcher, JSC «ScC VostNIi», 3, Institutskaya Street, Kemerovo, 650002, Russia



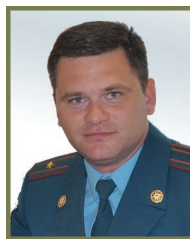
**Д. А. Бесперстов // D. A. Besperstov**  
gpnbesperstov@yandex.ru

аспирант ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности», 650056, г. Кемерово, ул. Институтская, 7  
chair post graduate of Kemerovo Institute of Food Science and Technology, 7, Institutskaya Street, Kemerovo, 650056, Russia



**В.Б. Попов // V. B. Popov**

д-р техн. наук, научный консультант лаборатории АО «НЦ ВостНИИ», Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3  
doctor of technical sciences, scientific consultant JSC «ScC VostNIi», 3, Institutskaya Street, Kemerovo, 650002, Russia



**С. Ю. Сайбель // S. Yu. Saibel**  
gpnbesperstov@yandex.ru

майор внутренней службы, начальник факультета заочного обучения института заочного обучения, переподготовки и повышения квалификации ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 153040, г. Иваново, пр-кт Строителей, 33  
distant education faculty head of distant education and refreshing training institute of Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters», internal service major, 33, Stroiteley Avenue, Ivanovo, 153040, Russia

УДК 31+614.841.315

## ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СКРЫТЫХ РИСКАХ ГИБЕЛИ ЛЮДЕЙ НА УГОЛЬНЫХ ПРЕДПРИЯТИЯХ FIRE SAFETY WITH HIDDEN RISKS OF LIFE LOSS AT COAL ENTERPRISES

*Раскрыты проблемы обеспечения безопасности людей на административно-бытовых комплексах (АБК) угольных предприятий. Указано, что основная проблема обусловлена невозможностью приведения всех зданий и сооружений, спроектированных и построенных до вступления в силу «технического регулирования» в Российской Федерации, к современным требованиям в области пожарной безопасности. «Слепое» выполнение существующих требований в области пожарной безопасности в настоящее время зачастую экономически не целесообразно. Вместе с этим, не всегда выполнение требований нормативно-технических актов обеспечивает безопасность людей при возникновении пожаров. В современных условиях для предприятий угольной промышленности, в большинстве относящихся к объектам крупного и среднего предпринимательства, не представляется возможным содержать значительные материально технические «замороженные» резервы на ликвидацию чрезвычайных ситуаций, связанных с пожарами. В работе отмечается необходимость в альтернативных, малозатратных мероприятиях, обеспечивающих пожарную безопасность людей в связи с правом собственника на риск имущества. С учетом изложенных проблем, приведена возможность обеспечения пожарной безопасности людей посредством средств спасения при возникновении пожара в здании или сооружении угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий.*

*People safety provision problems at coal enterprise office buildings (ABK) are disclosed. It is indicated that the main problem is caused by inability to bring all buildings and structures, designed and built before the entry into force of a "technical regulation" in the Russian Federation, to modern requirements in the field of fire safety.*

*"Blind" implementation of existing requirements in the field of fire safety is currently often not economically feasible. At the same time, not always keeping to the requirements of regulatory and technical rules ensures people's safety in case of fire. In modern conditions for the coal industry, the majority of which can be related to the objects of large and medium-sized businesses, it is not possible to contain substantial material and technical "frozen" provisions for liquidation of emergency situations involving fires. The paper notes the need for alternative, low-cost measures to ensure the fire safety of people in connection with the rights of the owner of the property at risk. Taking into account these problems, possibility to protect people from fire by rescue means in the buildings or structures of coal enterprises is shown.*

**Ключевые слова:** ПОЖАРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, УГОЛЬНЫЕ ПРЕДПРИЯТИЯ, ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОЖАРОБЕЗОПАСНОСТИ, ТРЕБОВАНИЯ В ОБЛАСТИ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ, СПАСЕНИЕ ЛЮДЕЙ, ОПАСНЫЕ ФАКТОРЫ ПОЖАРА, СРЕДСТВА СПАСЕНИЯ ПРИ ПОЖАРАХ

**Key words:** FIRE SAFETY, COAL ENTERPRISES, FIRE SAFETY PROVISION, FIRE SAFETY REQUIREMENTS, PEOPLE RESCUE, HAZARDS OF FIRE, FIRE RESCUE MEANS

**В** настоящее время достаточно часто обсуждается гибель людей, задействованных в выполнении подземных работ на угольных предприятиях, в то время как вопрос о возможной гибели в зданиях и сооружениях наземного комплекса мало освещен. Большинство данных зданий, построенных не один десяток лет назад, характеризуется значительным износом строительных конструкций.

Рассматриваемые здания спроектированы и введены в эксплуатацию значительно раньше вступления в силу «Технического регламента о требованиях пожарной безопасности» [1], в связи с чем при их приведении к современным требованиям в области пожарной безопасности возникают финансовые трудности, решение которых зачастую экономически нецелесообразно.

Оставлять в таком состоянии здания и сооружения также нельзя, так как в них не обеспечивается пожарная безопасность людей, а риск гибели превышает допустимые значения. Стоит отметить, что данные здания и сооружения спроектированы и построены по требованиям, которые в настоящее время не действуют [2]. Так, при определении способа обеспечения пожарной безопасности людей в зданиях, сооружениях 50–60-х годов возникает дилемма: стоит ли здания, строения предприятий отрасли приводить к современным требованиям или следует соблюдать на них отмененные нормы.

Вместе с тем здания и сооружения наземного комплекса угольных предприятий в последнее время характеризуются значительным нарастанием пожарной нагрузки за счет увеличения управленческого аппарата и увеличения пожарной нагрузки в виде мебели и отделочных материалов, а также нагрузок на электрические сети (одни из возможных источников загорания), в связи с применением значительного количества оргтехники и систем, а также вследствие повышения автоматизации технологических

процессов и производств.

На выполнение мероприятий в области пожарной безопасности требуются значительные материальные затраты, на которые собственники угледобывающих предприятий идут с неохотой. Организационная структура данных предприятий заключается в том, что фактически на объектах находится управленческий и исполнительный (рабочий) персонал. Собственники, заинтересованные в первую очередь в финансовой прибыли, расположены далеко за пределами деятельности предприятий. Все это приводит к пренебрежению безопасностью людей, находящихся непосредственно на угольных предприятиях, особенно обеспечением пожарной безопасности в зданиях, незадействованных в технологических процессах по добыче и переработке угля. Также в целях обеспечения безопасности работников, задействованных в угледобыче и переработке угля, предусмотрены дополнительные мероприятия по их экипировке в специальную одежду, обязательному страхованию в случае гибели или потери трудоспособности, что не распространяется на работников вспомогательных служб.

Федеральным законодательством урегулированы отношения, связанные с обязательным страхованием гражданской ответственности владельца опасного объекта, к которым относятся, в том числе и угольные предприятия, за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте. В соответствии с законодательством, владелец опасного объекта обязан за свой счет страховать в качестве страхователя имущественные интересы, связанные с обязанностью возместить вред, причиненный потерпевшим, путем заключения договора обязательного страхования [3].

Значительные затраты требуются на создание резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуа-

ций, в частности, связанных с пожарами. Резервы финансовых ресурсов создаются на предприятии в виде запаса денежных средств, целевое использование которых возможно на предупреждение или ликвидацию чрезвычайной ситуации. Резервы материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций создаются заблаговременно в целях экстренного привлечения необходимых средств в случае возникновения чрезвычайных ситуаций и включают продовольствие, пищевое сырье, медицинское имущество, медикаменты, транспортные средства, средства связи, строительные материалы, топливо, средства индивидуальной защиты. Резервы материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций создаются исходя из прогнозируемых видов и масштабов чрезвычайных ситуаций, предполагаемого объема работ по их ликвидации, а также максимально возможного использования имеющихся сил и средств для ликвидации чрезвычайных ситуаций [4, 5].

Одним из обязательных требований для угледобывающих и углеперерабатывающих предприятий является создание и аттестация нештатных аварийно-спасательных формирований. Аварийно-спасательное формирование – это самостоятельная или входящая в состав аварийно-спасательной службы структура, предназначенная для проведения аварийно-спасательных работ, основу которой составляют подразделения спасателей, оснащенные специальной техникой, оборудованием, снаряжением, инструментами и материалами. В свою очередь, аварийно-спасательная служба является совокупностью органов управления, сил и средств, предназначенных для решения задач по предупреждению и ликвидации чрезвычайных ситуаций, функционально объединенных в единую систему, основу которой составляют аварийно-спасательные формирования [6]. Но выполнение данного требования по надлежащему созданию нештатных аварийно-спасательных формирований, несмотря на его социальную эффективность, осуществляется путем заключения договора на проведение аварийно-спасательных работ со сторонними организациями, имеющими соответствующие лицензии и свидетельства. Такое исполнение требований носит формальный характер. Время прибытия таких формирований насчитывает часы, что значительно превышает время наступления опасных факторов пожара, которое находится в пределах двух минут. Фактически к прибытию формирований из других городов возникнет ситуация, не только связанная с гибелью людей, которые не смогут самостоя-

тельно покинуть здание до наступления опасных факторов пожара, но и с обрушением строительных конструкций из-за воздействия на них повышенных температурных режимов.

Военизированные горноспасательные части, в соответствии с нормативно-правовыми актами РФ, предназначены для выполнения работ по спасению людей, предупреждению и ликвидации аварий и чрезвычайных ситуаций на территориях организаций, ведущих горные и другие работы на опасных производственных объектах угольной, горнодобывающей, металлургической промышленности и подземного строительства [7]. К локализации и ликвидации пожаров наземных зданий и сооружений привлекаются силы и средства Федеральной противопожарной службы МЧС России. Их привлечение затруднено из-за значительной удаленности шахт, разрезов и обогатительных фабрик от места расположения пожарных частей, которые, как правило, расположены в населенных пунктах.

Удаленность угольных предприятий от населенных пунктов также может негативно сказаться на оказании врачебной помощи людям, пострадавшим при возникновении пожара, из-за трудностей, связанных со своевременной их доставкой в лечебные учреждения.

Несмотря на ряд проблем по обеспечению пожарной безопасности наземных административно-бытовых зданий и сооружений угольных предприятий, существуют у данных объектов и преимущества, которые необходимо использовать при разработке противопожарных мероприятий. Основное преимущество – контингент работников предприятия. Это, как правило, взрослые, работоспособные, обучаемые люди. Вместе с этим на предприятиях находится круглосуточная охрана, зачастую имеющая средства видеонаблюдения, что позволяет содержать в доступном наличии средства противопожарной защиты.

Рассмотрев ряд трудностей и преимуществ по обеспечению пожарной безопасности людей на угольных предприятиях, с учетом того, что собственники имущества имеют право им распоряжаться на свое усмотрение, в том числе и рисковать [8], назрела необходимость разработки социально-экономически эффективных противопожарных мероприятий, направленных на безопасность людей в зданиях и сооружениях.

Каждое здание или сооружение должно иметь объемно-планировочное решение и конструктивное исполнение эвакуационных путей, обеспечивающих безопасную эвакуацию людей

при пожаре. При невозможности безопасной эвакуации людей должна быть обеспечена их защита посредством применения систем коллективной и (или) индивидуальной защиты. Вместе с этим не всегда системы коллективной и индивидуальной защиты социально-экономически эффективны. Безопасная эвакуация людей из зданий и сооружений при пожаре считается обеспеченной, если интервал времени от момента обнаружения пожара до завершения процесса эвакуации людей в безопасную зону не превышает необходимого времени эвакуации людей при пожаре.

Системы коллективной защиты и средства индивидуальной защиты людей от воздействия опасных факторов пожара должны обеспечивать безопасность людей в течение всего времени воздействия на них опасных факторов пожара [9].

Системы коллективной защиты людей должны обеспечивать безопасность в течение всего времени развития и тушения пожара или времени, необходимого для эвакуации людей в безопасную зону. Безопасность людей в этом случае должна достигаться посредством объемно-планировочных и конструктивных решений безопасных зон в зданиях и сооружениях, в том числе посредством устройства незадымляемых лестничных клеток, а также посредством использования технических средств защиты людей на путях эвакуации от воздействия опасных факторов пожара, в том числе средств противодымной защиты.

Средства индивидуальной защиты людей, в том числе защиты их органов зрения и дыхания, должны обеспечивать их безопасность в течение времени, необходимого для эвакуации людей в безопасную зону, или в течение времени, необходимого для проведения специальных работ по тушению пожара. Средства индивидуальной защиты людей должны применяться как для защиты эвакуируемых и спасаемых людей, так и для защиты пожарных расчетов, участвующих в тушении пожара.

Исходя из требований, предъявляемых законодательными актами Российской Федерации к средствам индивидуальной и коллективной защиты, а также с учетом их технических характеристик, можно установить, что средства индивидуальной защиты для угольных предприятий малоэффективны несмотря на то, что они по своему назначению должны обеспечивать снижение недопустимого пожарного риска до допустимого. В зданиях данного функционального назначения опасные факторы пожара в боль-

шинстве случаев наступают по потере видимости. Такие средства основаны на защите органов дыхания от сильнодействующих отравляющих веществ, выделяемых в результате пожара, как правило, это противогазы, маски, костюмы малоэффективные при задымлении помещений и путей эвакуации. Угольные предприятия отличаются массовым пребыванием людей, особенно в дневное и рабочее время суток.

При оснащении зданий и сооружений следует отметить, что средства спасения с высоты являются единственной возможностью обеспечения безопасности людей при наступлении опасных факторов пожара до окончания их эвакуации в безопасную зону. Т.е. средства спасения с высоты обеспечивают безопасную эвакуацию людей, не имеющих возможности воспользоваться основными путями эвакуации.

Время спасения с использованием средств спасения определяется опытным путем (учебные тренировки). Оно не должно превышать критическое время достижения опасных факторов.

Оптимальное оснащение средствами спасения конкретного объекта зависит от возможных сценариев развития пожара, определяемого расчетным путем [10].

В общем случае тип и количество спасательных устройств, необходимых для спасения людей из здания при пожаре, определяются следующими факторами:

- контингентом людей, находящихся в здании и (или) сооружении (объектовом пункте пожаротушения или посту безопасности), с учетом их возраста и физического состояния;
- количеством людей, по тем или иным причинам не имеющих возможности покинуть здание и (или) сооружение за расчетное время эвакуации, пользующихся основными путями эвакуации;
- временем движения человека от наиболее удаленного помещения до спасательного устройства, мин;
- временем подготовки спасательного устройства к работе, мин;
- временем спуска первого человека на (в) спасательном устройстве, мин;
- пропускной способностью спасательного устройства, чел/мин;
- предельно допустимым временем проведения спасения, мин [9].

Методика определения минимально необходимого количества средств спасения в зависимости от наступления опасных факторов пожара с учетом коэффициента пожароопасности и со-

циально экономический эффект выбора средств спасения людей при пожарах в зданиях технологических комплексов горных предприятий подробно рассмотрена в статье [11].

Несмотря на то, что спасательные устрой-

ства по существующим нормам не предусматриваются при эвакуации людей, вместе с тем их применение зачастую остается единственно эффективным для обеспечения пожарной безопасности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности [Электронный ресурс]: федер. закон от 22.07.08г. № 123-ФЗ (ред. от 03.07.2016) URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_78699](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699) (дата обращения: 21.07.2016).
2. О техническом регулировании [Электронный ресурс]: федер. закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ (ред. от 05.04.2016). URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=196382&fld=134&from=189650-0&rnd=214990.6867658927338793&> (дата обращения: 21.07.2016).
3. Об обязательном страховании гражданской ответственности владельца опасного объекта за причинение вреда в результате аварии на опасном объекте [Электронный ресурс]: федер. закон от 27.07.2010 № 225-ФЗ (ред. от 23.05.2016) . URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=198243&fld=134&from=170575-0&rnd=214990.9906075854167504&> (дата обращения: 21.07.2016).
4. О защите населения и территорий от ЧС природного и техногенного характера [Электронный ресурс]: федер. закон от 21.12.1994 № 68 (ред. от 23.06.2016). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_5295/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/) (дата обращения: 21.07.2016).
5. Российская Федерация. Законы. Постановление Правительства РФ от 10.11.1996 № 1340 «О порядке создания и использования резервов материальных ресурсов для ликвидации ЧС природного и техногенного характера». М: Собрание законодательства РФ. 1996. N 47. ч.1. ст. 5334.
6. Об аварийно-спасательных службах и статусе спасателей [Электронный ресурс]: федер. закон от 22.08.1995 № 151 (ред. от 02.07.2013). URL: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_7746/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_7746/) (дата обращения: 21.07.2016).
7. Об утверждении Положения о военизированных горноспасательных частях, находящихся в ведении Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий [Электронный ресурс]: федер. закон от 28.01.2012г. № 45 (В ред. Постановления Правительства Российской Федерации от 25.03.2013 г. N 257). URL: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102153726&rdk=&backlink=1> (дата обращения: 21.07.2016).
8. Конституция Российской Федерации [Электронный ресурс]: федер. закон от 21.07.2014 (с учетом поправок, внесенных Законами РФ о поправках к Конституции РФ от 30.12.2008 N 6-ФКЗ, от 30.12.2008 N 7-ФКЗ, от 05.02.2014 N 2-ФКЗ, от 21.07.2014 N 11-ФКЗ). URL: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=2875> (дата обращения: 21.07.2016).
9. Методические рекомендации по применению средств индивидуальной защиты и спасения людей при пожаре [Электронный ресурс]: Утв. гл. гос. инспектором РФ по пожарному надзору генерал-полковником Кирилловым Г.Н. от 11.10.2011г. №2-4-60-12-19. URL: <https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2F71.mchs.gov.ru%2Fupload%2Fsite%2Ffiles%2F27e22958606475ab86d6487f4246085e.doc&name> (дата обращения: 21.07.2016).
10. Фомин, А. И., Бесперстов Д. А. Средства и способы самоспасения при пожарах в зданиях технологических комплексов предприятий угольной отрасли // Вестник Научного центра по безопасности в угольной промышленности. 2015. № 2. С. 84–89
11. Фомин, А. И., Бесперстов Д. А. Оценка пожарной безопасности людей и обеспечение средствами спасения при возникновении пожаров на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях Кемеровской области // Вестник Научного центра по безопасности в угольной промышленности. 2015. № 1. С. 24–29.

### REFERENCES

1. *Tekhnicheskii reglament otrebovaniikh pozharnoi bezopasnosti: federalny zakon* Federal Law: Technical Regulations on Fire Safety Requirements dated by 22.07.2008, No. 123-FZ (Edited on 03.07.2016). [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) Retrieved from: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_78699](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_78699) [in Russian].
2. *O tekhnicheskome regulirovanii* Federalny zakon [On technical regulation, federal Law dated by 27.12.2002 No. 184-FZ (edited on 05.04.2016)]. [base.consultant.ru](http://base.consultant.ru) Retrieved from: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=196382&fld=134&from=189650-0&rnd=214990.6867658927338793&> [in Russian].
3. *Ob obiazatelnom strakhovanii grazhdanskoi otvetstvennosti vladelitsa opasnogo objekta za prechineniia vreda v rezultate avarii na opasnom objekte.* Federalny zakon [On obligatory civil liability insurance of the owner of a hazardous facility for causing harm as a result of an accident at the hazardous facility. Federal Law dated by 27.07.2010 No. 225-FZ (edited on 23.05.2016)]. [base.consultant.ru](http://base.consultant.ru) Retrieved from: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=198243&fld=134&from=170575-0&rnd=214990.9906075854167504&> [in Russian].
4. *O zashchite naseleniia i territorii ot ChS prirodnogo i tekhnogenного kharaktera.* Federalni zakon [On population and territories protection from emergency situations of natural and man-made character. Federal Law dated by 21.12.1994 No. 68 (edited on 23.06.2016)]. [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) Retrieved from: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_5295/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_5295/) [in Russian].
5. *Rossiiskaia Federatsia. Zakony. Postanovlenie Pravitelstva RF ot 10.11.1996 No. 1340 "O poriadke sozdania i ispolzovania rezervov materialnykh resursov dlia likvidatsii ChS prirodnogo i tekhnogenного kharaktera"* [Russian Federation. Laws. RF Government Decree of 10.11.1996 No 1340 "On the order of creation and use of material resources reserves for liquidation of emergency situations of natural and technogenic character". Moscow, RF Law Collection. 1996, No. 47, p.5334 [in Russian].
6. *Ob avariino-spasatelnykh sluzhbakh i statuse spasatelei.* Federalny Zakon [On the emergency services and the status

- of rescuers. Federal Law dated by 22.08.1995, No. 151 (edited on 02.07.2013). [www.consultant.ru](http://www.consultant.ru) Retrieved from: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_7746/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_7746/) [in Russian].
7. Ob utverzhdenii Polozheniia o voenizirovannykh gornospasatelnykh chastiakh, nakhodiashchikhsia v vedenii Ministerstva Rossiiskoi Federatsii po delam grazhdanskoi oborony, chrezvychainym situatsiiam i likvidatsii posledstviu stikhiinykh bedstviu. Federalny Zakon [On approval of the paramilitary rescue units under the jurisdiction of the Russian Federation Ministry of Civil Defence, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, dated by 28.01.2012, No. 45 (Edited by RF Government Decree No. 257, dated by 25.03.2013). [pravo.gov.ru](http://pravo.gov.ru) Retrieved from: <http://pravo.gov.ru/proxy/ips/?docbody=&nd=102153726&rdk=&backlink=1> [in Russian].
  8. Konstitutsiia Rossiiskoi Federatsii [Russian Federation Constitution. Federal Law dated by 21.07.2014 (with ammendments dated by 30.12.2008 No. 6-FKZ, by 30.12.2008 No. 7-FKZ, dated by 05.02.2014 No. 2-FKZ, dated by 21.07.2014 No. 11-FKZ)]. [base.consultant.ru](http://base.consultant.ru) Retrieved from: <http://base.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=2875> [in Russian].
  9. Metodicheskie rekomendatsii po primeneniiu sredstv individualnoi zashchity i spaseniia liudei pri pozhare [Guidelines on the use of personal protective equipment and people rescue in case of fire. Approved by chief state inspector for fire protection in RF Colonel General Kirillov G.N. on 11.10.2011, No. 2-4—60-12-19]. [docviewer.yandex.ru](https://docviewer.yandex.ru/) Retrieved from: <https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2F71.mchs.gov.ru%2Fupload%2Fsite28%2Ffiles%2F27e22958606475ab86d6487f4246085e.doc&name> [in Russian].
  10. Fomin, A.I., & Besperstov, D.A. (2015) Sredstva I sposoby samospaseniia pri pozharakh v zdaniakh tekhnologicheskikh kompleksov predpriatii ugolnoi otrasli [Means and methods for self-rescue at fires in the technological complex buildings of coal industry enterprises]. *Vestnik Nauchnogo tsentra po bezopasnosti v ugolnoi promyshlennosti - Scientific Center for Safety in Coal Industry Gerald*, 2, 84-89 [in Russian].
  11. Fomin, A.I., & Besperstov, D.A. (2015) Otsenka pozharnoi bezopasnosti liudei i obespecheniie sredstvami spaseniia pri vozniknovenii pozharov na ugledobyvaiushchikh I uglepererabatyvaiushchikh predpriatiakh Kemerovskoi oblasti [People fire safety evaluation and rescue means provision in cases of fire at coal mining and coal processing enterprises of Kemerovo Region]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti v ugolnoi promyshlennosti – Scientific Center for Safety in Coal Industry Gerald*, 1, 24-29 [in Russian].

## ООО "ГОРНЫЙ-ЦОТ"

серийно производит приборы контроля параметров безопасности рудничной атмосферы угольных шахт, которые успешно эксплуатируются на предприятиях угольной отрасли. Сегодня благодаря их успешному применению на шахтах компания стала надежным звеном в решении проблем промышленной безопасности как в России, так и за ее пределами.

### ВЫПУСКАЕМЫЕ ПРИБОРЫ



Прибор контроля запыленности воздуха ПКА-01



Прибор контроля пылевзрывобезопасности горных выработок ПКП



Портативные газоанализаторы GaSense (1-,2-,3-,4-газовые)



Измеритель запыленности стационарный ИЗСТ-01



Система контроля параметров дегазационной сети СКП ДС



Стационарный анализатор контроля параметров атмосферы Gasos заперемычного пространства





**А. И. Фомин // A. I. Fomin**  
ncvostnii@yandex.ru

д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела АО «НЦ ВостНИИ», Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3  
doctor of technical sciences, department leading scientific researcher, JSC «ScC VostNIi», 3, Institutskaya Street, Kemerovo, 650002, Russia



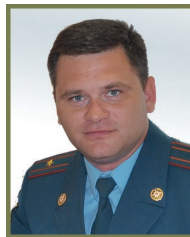
**Д. А. Бесперстов // D. A. Besperstov**  
gpnbesperstov@yandex.ru

аспирант ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности», 650056, г. Кемерово, ул. Институтская, 7  
chair post graduate of Kemerovo Institute of Food Science and Technology, 7, Institutskaya Street, Kemerovo, 650056, Russia



**В.Б. Попов // V. B. Popov**

д-р техн. наук, научный консультант лаборатории АО «НЦ ВостНИИ», Россия, 650002, г. Кемерово, ул. Институтская, 3  
doctor of technical sciences, scientific consultant JSC «ScC VostNIi», 3, Institutskaya Street, Kemerovo, 650002, Russia



**С. Ю. Сайбель // S. Yu. Saibel**  
gpnbesperstov@yandex.ru

майор внутренней службы, начальник факультета заочного обучения института заочного обучения, переподготовки и повышения квалификации ФГБОУ ВО «Ивановская пожарно-спасательная академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 153040, г. Иваново, пр-кт Строителей, 33  
distant education faculty head of distant education and refreshing training institute of Federal State Budget Educational Establishment of Higher Education «Ivanovo Fire Rescue Academy of State Firefighting Service of Ministry of Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters», internal service major, 33, Stroiteley Avenue, Ivanovo, 153040, Russia

УДК 614.849

## ВЛИЯНИЕ ЕДИНОЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА РИСК ГИБЕЛИ ЛЮДЕЙ ПРИ ПОЖАРАХ

### THE IMPACT OF THE UNIFIED STATE SYSTEM OF PREVENTION AND LIQUIDATION OF EMERGENCY SITUATIONS AT THE RISK OF LOSS OF LIFE IN FIRES

*В статье изложены законодательные и нормативные предпосылки деятельности единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций при возникновении пожаров. Рассмотрена процедура оценки соответствия объектов различных классов функциональной пожарной опасности требованиям в области пожарной безопасности путем проведения расчетов пожарных рисков для оценки пожарной безопасности объекта. Проведен анализ влияния требований в области пожарной безопасности на пожарные риски, а также на чрезвычайные ситуации, связанные с пожарами. В целях снижения риска гибели людей при пожарах, выполнения комплекса мероприятий единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций предложено выполнение ряда основных задач. Описаны задачи, поставленные перед единой государственной системой предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций по снижению риска гибели людей при пожарах. Выполненный анализ позволил сделать выводы, что на пожарные риски гибели людей влияют не только противопожарные мероприятия, осуществляемые в соответствии с нормативными документами по пожарной безопасности к объектам защиты. Существенное влияние на снижение пожарных рисков оказывает комплекс мероприятий всех подсистем единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций РФ, направленных на обеспечение пожарной безопасности людей.*

*The article described legislative and regulatory prerequisites for the activity of the unified state system for*

*preventing and eliminating emergencies in the event of fires. The procedure for assessing the compliance of objects of different classes of functional fire hazard with fire safety requirements was carried out by carrying out fire risk calculations to assess the fire safety of the facility. An analysis was made of the impact of fire safety requirements on fire risks, as well as on emergency situations related to fires. In order to reduce the risk of deaths in fires, the implementation of a complex of measures of the unified state system of prevention and liquidation of emergency situations, it was proposed to perform a number of basic tasks. The tasks set for the single state system of preventing and eliminating emergencies to reduce the risk of deaths in fires were described. The performed analysis made it possible to draw conclusions that fire safety risks of people's deaths are affected not only by fire fighting measures carried out in accordance with fire safety regulations for protection objects. Significant impact on the reduction of fire risks is provided by a complex of measures of all subsystems by the unified state system for preventing and eliminating emergencies of the Russian Federation aimed at ensuring fire safety of people.*

**Ключевые слова:** РИСК ГИБЕЛИ ЛЮДЕЙ, ЕДИНАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ И ЛИКВИДАЦИИ ЧС, БЕЗОПАСНОСТЬ ЛЮДЕЙ, ЧС ПРИ ПОЖАРЕ, ИНДИВИДУАЛЬНЫЙ ПОЖАРНЫЙ РИСК, ЗАДАЧИ ЕДИНОЙ СИСТЕМЫ

**Key words:** RISK OF PEOPLE'S DEATH, A UNIFIED STATE SYSTEM FOR PREVENTING AND ELIMINATING EMERGENCIES, PEOPLE'S SAFETY, EMERGENCY IN CASE OF FIRE, INDIVIDUAL FIRE RISK, THE TASKS OF THE UNIFIED SYSTEM

**В** о исполнение Федерального закона Российской Федерации от 27.12.2002 № 184 «О техническом регулировании», а также в целях защиты жизни, здоровья, имущества физических и юридических лиц, государственного и частного имущества от пожаров был принят Федеральный закон Российской Федерации от 22.07.2008 № 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».

В соответствии с техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности принято Постановление Правительства Российской Федерации от 31.03.2009 № 272 «О порядке проведения расчетов по оценке пожарного риска», а также Приказы МЧС России от 10.07.2009 № 404 «Методика определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах», от 30.06.2009 № 382 «Методика определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности».

С учетом указанных законодательных и нормативно правовых актов в Российской Федерации, в настоящее время, предусмотрена процедура оценки соответствия объектов различных классов функциональной пожарной опасности, установленным требованиям в области пожарной безопасности, путем проведения расчетов пожарных рисков.

Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности установлено, что на объекте защиты обеспечивается безопасность людей и имущества при выполнении одного из следующих условий:

1) в полном объеме выполнены требова-

ния пожарной безопасности, установленные техническими регламентами, принятыми в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании», и пожарный риск не превышает допустимых значений, установленных Техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности;

2) в полном объеме выполнены требования пожарной безопасности, установленные техническими регламентами, принятыми в соответствии с Федеральным законом «О техническом регулировании», и нормативными документами по пожарной безопасности [1].

Также в соответствии с данным техническим регламентом под объектом защиты понимается продукция, в том числе имущество граждан или юридических лиц, государственное или муниципальное имущество (включая объекты, расположенные на территориях поселений, а также здания, сооружения, транспортные средства, технологические установки, оборудование, агрегаты, изделия и иное имущество), к которой установлены или должны быть установлены требования пожарной безопасности для предотвращения пожара и защиты людей при пожаре [1].

С учетом вышеизложенного, при невозможности выполнения всех требований в области пожарной безопасности или экономической не целесообразности их реализации расчет пожарных рисков является единственным решением по оценке пожаробезопасности объекта.

Расчеты пожарных рисков проводятся для объектов защиты, за исключением зданий с детьми и маломобильных групп населения, а также жилых домов согласно методики определения расчетных величин индивидуального по-

жарного риска ( $Q_0$ ), основанной на статистических данных возникновения пожара в здании в течение года ( $Q_n$ ), соответствии систем противопожарной защиты ( $K_{ан}$ ,  $K_{нз}$ ), присутствии людей в здании ( $P_{np}$ ) и вероятности эвакуации людей в безопасную зону до наступления опасных факторов пожара ( $P_3$ ). В свою очередь вероятность эвакуации людей зависит от расчетного времени их эвакуации ( $t_p$ ), времени начала эвакуации ( $t_{нз}$ ), времени от начала пожара до блокирования эвакуационных путей в результате распространения на них опасных факторов пожара ( $t_{ан}$ ), а также времени существования скопления людей на участках пути ( $t_{ск}$ ).

Для зданий с детьми и маломобильных групп населения, а также многоквартирных и многоквартирных жилых домов вместе с вышеприведенными параметрами учитывается дислокация подразделений пожарной охраны на территории поселений и городских округов ( $K_{фмс}$ ), соблюдение требований нормативных документов по пожарной безопасности к оснащению здания первичными средствами пожаротушения и аварийным выходам ( $K_{ф}$ ), а также соответствие требований к путям эвакуации ( $K_{эв}$ ) [2, 3].

Вышеизложенные параметры, влияющие на пожарные риски, за исключением дислокации подразделений пожарной охраны, зависят от выполнения мероприятий разрабатываемых на объектах.

В свою очередь существуют следующие виды пожарной охраны:

государственная противопожарная служба;

- муниципальная пожарная охрана;
- ведомственная пожарная охрана;
- частная пожарная охрана;
- добровольная пожарная охрана [4].

Как мы видим, необходимо выполнения комплекса мероприятий по предупреждению чрезвычайных ситуаций связанных с пожарами объектового, муниципального, регионального, межрегионального и федерального уровня, так как деятельность пожарной охраны распространяется на всех уровнях чрезвычайных ситуаций.

В целях предупреждения возникновения и развития чрезвычайных ситуаций, снижения размеров ущерба и потерь, надлежащего проведения мероприятий по ликвидации чрезвычайных ситуаций, а также разграничения полномочий в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций между федеральными органами исполнительной власти, органами исполнительной власти субъектов Российской Федерации, органами местного самоуправле-

ния и организациями в Российской Федерации создана единая государственная система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций. Единая система действует на всех существующих уровнях чрезвычайных ситуаций [5].

Для достижения цели, по выполнению комплекса противопожарных мероприятий, единой государственной системе предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций необходимо выполнение следующих задач:

1. разработка и реализация правовых и экономических норм по обеспечению защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций связанных с пожарами;

2. осуществление целевых и научно-технических программ, направленных на предупреждение чрезвычайных ситуаций и повышение устойчивости функционирования организаций, а также объектов социального назначения в чрезвычайных ситуациях;

3. обеспечение готовности к действиям органов управления, сил и средств, предназначенных и выделяемых для предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций;

4. сбор, обработка, обмен и выдача информации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций;

5. подготовка населения к действиям в чрезвычайных ситуациях, в том числе организация разъяснительной и профилактической работы среди населения в целях предупреждения возникновения чрезвычайных ситуаций;

6. организация оповещения населения о чрезвычайных ситуациях и информирования населения о чрезвычайных ситуациях, в том числе экстренного оповещения населения (муниципальный уровень);

7. прогнозирование угрозы возникновения чрезвычайных ситуаций, оценка социально-экономических последствий чрезвычайных ситуаций;

8. создание резервов финансовых и материальных ресурсов для ликвидации чрезвычайных ситуаций;

9. осуществление государственной экспертизы, государственного надзора в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций;

10. ликвидация чрезвычайных ситуаций;

11. осуществление мероприятий по социальной защите населения, пострадавшего от чрезвычайных ситуаций, проведение гуманитарных акций;

12. реализация прав и обязанностей населения в области защиты от чрезвычайных ситуа-

ций, а также лиц, непосредственно участвующих в их ликвидации [5].

Проведенный анализ показал, что на пожарные риски гибели людей влияют не только противопожарные мероприятия, установленные нормативными документами по пожарной безопасности к объектам защиты. На снижение по-

жарных рисков также влияет комплекс мероприятий всех подсистем единой государственной системой предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций Российской Федерации, направленных на обеспечение пожарной безопасности людей.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : федер. закон Рос. Федерации от 22.07.08г. (ред. от 23.06.2014) № 123-ФЗ: [принят Гос. Думой 22.07.08 (с изм. и доп., вступ. в силу с 13.07.2014)]. Режим доступа: [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_159028](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_159028).
2. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска в зданиях, сооружениях и строениях различных классов функциональной пожарной опасности : приказ МЧС России от 30.06.2009г. № 382 // Российская газета. 2009. № 161. 32 с.
3. Об утверждении методики определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах : приказ МЧС России от 10.07.2009г № 404 // Российская газета. 2009. № 37. 38 с.
4. О пожарной безопасности : федеральный закон Рос. Федерации от 21.12.1994 № 69-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 13.07.2013) // Собрание законодательства РФ. 1994. № 35. Ч. 1. Ст. 3649.
5. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : федеральный закон Рос. Федерации от 21.12.1994 г. № 68-ФЗ (с изм. и доп., вступ. в силу с 15.02.2016) // Собрание законодательства РФ. 1994. № 35. Ст. 3648.

### REFERENCES

1. "Tekhnicheskiy reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti : Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii" 22.07.2008 N 123-FZ ["Tekhnicheskiy reglament o trebovaniyakh pozharnoy bezopasnosti : Federal'nyy zakon Rossiyskoy Federatsii" 22.07.2008 N 123-FZ]. (n.d.). Retrieved from [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_159028](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_159028) [In Russian].
2. Russia, MCHS. (2009). Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska v zdaniyakh, sooruzheniyakh i stroyeniyakh razlichnykh klassov funktsional'noy pozharnoy opasnosti : Prikaz MCHS Rossii ot 30.06.2009g. № 382 [About the statement of a technique of definition of settlement sizes of a fire risk in buildings, constructions and structures of various classes of functional fire danger: The order of the Ministry of Emergency Measures of Russia from 30.06.2009. No. 382]. *Rossiyskaya gazeta- Russian newspaper*, (161), 32. [In Russian].
3. Russia, MCHS. (2009). Ob utverzhdenii metodiki opredeleniya raschetnykh velichin pozharnogo riska na proizvodstvennykh ob'yektakh : prikaz MCHS Rossii ot 10.07.2009g № 404
4. On the approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities: the order of the Ministry of Emergency Situations of Russia from 10.07.2009 No. 404 [On the approval of the methodology for determining the calculated values of fire risk at production facilities: the order of the Ministry of Emergency Situations of Russia from 10.07.2009 No. 404]. *Rossiyskaya gazeta- Russian newspaper*, (37), 38. [In Russian].
5. Russia. (1994). O pozharnoy bezopasnosti : Federal'nyy zakon Ros. Federatsii ot 21.12.1994 № 69-FZ. (s izm. i dop., vstup. v silu s 13.07.2013) [On Fire Safety: Federal Law Ros. Federation of December 21, 1994 No. 69-FZ (with amendments and additions, effective from July 13, 2013)]. *Sobraniye zakonodatel'stva RF - Collection of legislation of the Russian Federation, part 1, art. 3649*. [In Russian].
6. Russia. (1994). O zashchite naseleniya i territoriy ot chrezvychaynykh situatsiy prirodnogo i tekhnogennogo kharaktera : Federal'nyy zakon Ros. Federatsii ot 21.12.1994 g. № 68-FZ (s izm. i dop., vstup. v silu s 15.02.2016) [On the protection of the population and territories from emergency situations of natural and man-made nature: The federal law of the Russian Federation. Of the Federation of December 21, 1994 No. 68-FZ (with amendment and addendum, entered into force on February 15, 2016)]. *Sobraniye zakonodatel'stva RF - Collection of legislation of the Russian Federation*, 35, part. 3648. [In Russian].

### III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ III. TECHNOLOGICAL QUESTIONS OF MINING WORK SAFETY



**А.В. Шадрин // A.V. Shadrin**  
avsh-357@mail.ru

д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геофизических исследований горного массива Института угля ФГБНУ ФИЦ УУХ СО РАН, Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10  
doctor of Technical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Geophysical Research of the Rock Massif of Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, , 10, Leningrad Avenue, Kemerovo, 650065, Russia



**В. И. Клишин // V. I. Klishin**  
klishinvi@icc.kemsc.ru

д-р техн. наук, профессор, чл.-корр. РАН, директор ФГБНУ «ФИЦ УУХ СО РАН», Россия, 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10  
doctor of technical sciences, professor, corresponding member of RAS, director of the Institute of Federal Research Center for Coal and Coal Chemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10, Leningrad Avenue, Kemerovo, 650065, Russia

УДК 622.831.322

### УСТАНОВЛЕНИЕ СВЯЗИ ПАРАМЕТРОВ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ С ФИЛЬТРАЦИОННО-КОЛЛЕКТОРСКИМИ СВОЙСТВАМИ МАССИВА И ХАРАКТЕРИСТИКАМИ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ГИДРООБРАБОТКЕ КРОВЛИ И УГОЛЬНОГО ПЛАСТА

### CONNECTION OF ACOUSTIC EMISSION PARAMETERS WITH FILTRATION-COLLECTIVE PROPERTIES OF THE MASSIF AND THE PUMP UNIT PERFORMANCE FOR HYDRAULIC PROCESSING OF ROOF AND COAL-LAYER

*Представлены результаты исследований по установлению функциональных связей между параметрами акустической эмиссии (АЭ) и фильтрационно-коллекторскими и прочностными свойствами горного массива, а также параметрами насосной установки при нескольких способах гидрообработки горного массива в угольных шахтах с целью снижения опасности динамических явлений.*

*Показано, что для эффективного низконапорного увлажнения угля активность АЭ не должна превышать фоновое значение, измеренное до начала нагнетания жидкости в горный массив.*

*При гидрорыхлении пласта активность АЭ приобретает дополнительную к фоновой составляющую, которая определяется пористостью и водопроницаемостью пласта, вязкостью жидкости, перепадом давления жидкости от стенок трещин до фронта фильтрации, геометрическими размерами и углами ориентации развивающихся трещин, соотношением вертикальной и горизонтальной составляющих горного давления, механическими свойствами пласта и временем нагнетания. Причем зависимость активности АЭ от времени при постоянном темпе нагнетания такова, что при подъеме давления жидкости в скважине на начальном этапе она быстро возрастает от фонового значения до максимального, а затем снижается по мере увеличения размеров трещин и фильтрационного потока жидкости в их стенки. С увеличением темпа нагнетания уменьшается время до прорыва жидкости по растущим трещинам на забой и объем закачанной жидкости, а значения активности АЭ возрастают.*

*При направленном гидроразрыве кровли пласта длина растущей трещины связана с суммарным числом импульсов АЭ экспоненциальной зависимостью, что позволяет по измеренному числу импульсов АЭ оценить длину и площадь растущей трещины.*

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).*

*The results of studies on the establishment of functional relationships between the acoustic emission (AE) parameters and the filtration-collection and strength properties of the rock mass were presented, as well as the parameters of the pumping unit for several methods of hydroprocessing a mountain massif in coal mines in order to reduce the danger of dynamic phenomena.*

*It was shown that for effective low-pressure humidification of coal, the activity of the AE should not exceed the background value measured before the injection of liquid into the mountain mass.*

*When the formation is hydrodisturbed, the activity of the AE acquires an additional to the background component, which is determined by the porosity and permeability of the formation, the viscosity of the liquid, the pressure drop of the fluid from the crack walls to the filtration front, the geometric dimensions and orientation angles of the developing cracks, the ratio of the vertical and horizontal components of the rock pressure, and the time of injection. Moreover, the dependence of the AE activity on time at a constant injection rate is such that when the fluid pressure in the well rises at the initial stage, it rapidly increases from the background value to the maximum value, and then decreases as the size of cracks and the filtration flow of liquid into their walls increase. With an increase in the injection rate, the time to breakthrough the fluid along the growing cracks on the face and the volume of the injected liquid decreases, and the AE activity values increase.*

*With the directed fracture of the roof of the formation, the length of the growing crack is related to the total number of pulses of the AE by an exponential dependence, which makes it possible to estimate the length and area of the growing crack from the measured number of AE pulses.*

*The study was carried out through a grant from the Russian Science Foundation (project No. 17-17-01143).*

**Ключевые слова:** ОПАСНОСТЬ ДИНАМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ, ГИДРООБРАБОТКА ТРУДНООБРУШАЕМОЙ КРОВЛИ И УГОЛЬНОГО ПЛАСТА, АКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ, ФИЛЬТРАЦИОННО-КОЛЛЕКТОРСКИЕ И ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА МАССИВА, ПАРАМЕТРЫ НАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

**Key words:** DANGER OF DYNAMIC PHENOMENA, HYDRAULIC PROCESSING OF A DIFFICULTY ROOF AND COAL PLAST, ACOUSTIC EMISSION, FILTRATION AND COLLECTIVE AND STRENGTH PROPERTIES OF MASSIF, PARAMETERS OF THE PUMP INSTALLATION

**Введение**  
Известны методики применения гидрообработки угольных пластов для борьбы с газодинамическими явлениями, пылевыведением, борьбы с эндогенными пожарами. Гидрообработка угольных пластов применяется также для исключения площадного зависания труднообрушаемых пород и резких динамических воздействий их при обрушении на механизированные крепи в угольных шахтах путем применения метода направленного гидроразрыва основной кровли [1]. Гидрообработка находит применение также для повышения газопроницаемости угольного пласта. С этой целью жидкость подается в скважины, пробуренные по углю, в режиме гидрорасчленения, при котором в угле создается сеть трещин, повышающая газопроницаемость и газоотдачу пласта [2]. Разновидностью этого метода является поинтервальный гидроразрыв пласта [3]. Для локального повышения газопроницаемости и разгрузки призабойного пространства применяется также нагнетание жидкости в шпуров в режиме гидроотжима [4].

Гидрообработка угля применяется также с целью его увлажнения, поскольку установлено, что при влажности угля свыше 6% внезапные выбросы никогда не происходили [5]. Это объяс-

няется тем, что при такой влажности газ блокируется в микротрещинах и порах и не переходит в свободное состояние, не повышая внутрипластовое давление; уголь становится более пластичным, вследствие чего зона опорного давления отодвигается в глубь массива, снижая и выбросо-, и удароопасность.

Для увлажнения угля жидкость в пласт подается в режимах либо низконапорного увлажнения, либо гидрорыхления. В режиме низконапорного увлажнения, рекомендуемом для пластов с высокой водопроницаемостью, дополнительные трещины нагнетаемой жидкостью не создаются, а жидкость распространяется по существующим природным трещинам, из них – в микротрещины и поры, равномерно увлажняя уголь. В режиме гидрорыхления, рекомендуемом для углей с меньшей водопроницаемостью, чем в предыдущем случае, нагнетаемая жидкость создает дополнительную сеть трещин, из которых увлажняется уголь.

Все вышеуказанные способы гидрообработки кровли пласта и угольного массива характеризуются определенной интенсивностью развития трещин. Поскольку трещины развиваются скачкообразно, то под интенсивностью развития трещин понимается число «скачков» растущих трещин в единицу времени. Однако

механизма контроля роста трещин при гидрообработке горного массива в шахтных условиях нет, так как технологией всех известных способов гидрообработки предусматривается только регистрация давления и скорости нагнетания жидкости. Между тем растущая трещина является источником акустической эмиссии, регистрация которой позволяет фиксировать, во-первых, факт скачкообразного роста трещин, во-вторых, - интенсивность скачкообразного роста трещин во времени, а при более сложной модификации метода можно осуществлять определение координат растущего участка трещины и оценивать энергию акустического излучения [6, 7].

Это позволяет ставить задачу о контроле методом акустической эмиссии процесса гидрообработки горного массива для достижения цели, определяемой запланированным режимом нагнетания жидкости в угольный пласт или в труднообрушаемую кровлю.

Рассматриваемые способы гидрообработки горного массива характеризуются большим числом разнородных параметров. Прежде всего, это параметры, характеризующие эффективность способа. Следующая группа параметров определяет технологию осуществления способа. Третья группа характеризует насосную установку. Соответственно, назовем эти группы параметров контрольными, технологическими и гидравлическими.

При направленном гидроразрыве труднообрушаемой кровли контрольными параметрами являются необходимая длина и направление создаваемой трещины, при которых обеспечивается обрушение и снижение площади кровли, зависящей над выработанным пространством.

А при гидрообработке угольного пласта с целью снижения опасности проявления динамических явлений этими параметрами будут необходимые для устранения опасности влажность угля при низконапорном увлажнении, низконапорной пропитке и гидрорыхлении пласта и величина выдвигания угольного забоя при гидротжиме пласта. В настоящее время контрольные параметры целесообразно определять согласно «Инструкции по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа» [4], поскольку в последней редакции «Инструкции...» [8] этих сведений нет.

Технологическими параметрами являются количество одновременно подключаемых к нагнетательной установке скважин (шпуров), их длина и диаметр, расположение, длина или глубина герметизации, расположение искусствен-

но инициирующих щелей относительно горных выработок и слоев кровли, а также время гидрообработки. Технологические параметры при гидрообработке угольных пластов также выбираются в соответствии с указанной «Инструкцией...» [8] и согласуются с принятым циклом проходки или выемки угля. При обосновании технологических параметров направленного гидроразрыва труднообрушаемой кровли руководствуются нормативным документом [9] и могут дополнительно использовать рекомендации по применению этого способа гидрообработки применительно к конкретному шахтопласту (см., например [10]).

Гидравлическими параметрами являются давление и скорость (темп) нагнетания.

Под оптимальными гидравлическими параметрами способа гидрообработки будем понимать такие величины давления и темпа нагнетания, при которых контрольный параметр достигается за минимально возможное время.

Как угольный пласт, так и породная кровля, подверженные гидрообработке, являются твердыми телами, нагруженными горным давлением и работающими упруго. Отличие их состоит в прочностных характеристиках и фильтрационно-коллекторских свойствах. Однако в обоих случаях жидкость расходуется на заполнение полости растущей трещины и фильтрацию в ее стенки. Поэтому подход к использованию акустической эмиссии (АЭ) для контроля процесса как гидрообработки угольного пласта, так и гидроразрыва кровли может быть общим.

Большинство применяемых в настоящее время насосных установок без гидроаккумуляторов имеют жесткую рабочую характеристику, т.е. для них темп нагнетания сохраняется практически постоянным вне зависимости от фильтрационно-коллекторских свойств массива. К таковым относятся насосные установки типа НВУ-30М, УНВ-2, УН-35, 2УГН, с помощью которых осуществляется гидрообработка угольного пласта, и насосы типа Т, спроектированные для питания механизированной крепи водомасляной эмульсией, которые используются для направленного гидроразрыва труднообрушаемой кровли. В частности, для этой цели находят широкое применение насос типа Т-200/32 Ex-Z [11-13].

Поэтому рассмотрим возможность использования метода АЭ для определения оптимальных гидравлических параметров гидрорыхления угольного пласта и гидроразрыва кровли применительно к этим насосным установкам. В дальнейшем оба эти процесса будем называть единым термином – гидрообработка, за исклю-

чением случаев, обусловленных спецификой этих способов.

### Постановка задачи

Осветим общий подход к рассматриваемой задаче.

Среду, в которой осуществляется гидрообработка, будем рассматривать как упругую, т.к. АЭ в процессе трещинообразования обычно представляет собой волны разгрузки, а разгрузка происходит в основном упруго, даже в пластически работающем материале [14].

Поскольку приемные преобразователи АЭ по принципу действия являются или виброметрами, или велосиметрами, или акселерометрами, полное описание процесса развития трещины заключается в нахождении пространственно-временного распределения перемещений, скоростей или ускорений точек окрестности среды, примыкающей к преобразователю, иначе говоря, сводится к нахождению поля перемещений.

Решение этой задачи в реальных условиях осложняется по ряду причин. Во-первых, трещина как источник АЭ является сложным объектом и поэтому требует значительной идеализации своих свойств при построении математической модели. Во-вторых, сложное строение угольного пласта приводит к переотражениям сигналов АЭ от различного рода неоднородностей и границ раздела слоистой среды, каковой является угольный пласт с вмещающими породами. В-третьих, имеют место трансформация типов акустических волн, затухание и дисперсия волнового движения и т.д. [15]. Наконец, для реальных трещин - источников АЭ достаточно сложно формулируются граничные и начальные условия на их поверхностях.

Эти обстоятельства обуславливают невозможность получения общего решения сформулированной задачи современными аналитическими методами из-за непреодолимых математических трудностей. Исключение составляют некоторые простые частные случаи при условии введения дополнительных упрощающих гипотез. Поэтому ограничимся лишь регистрацией факта скачкообразного развития трещины, считая, если таковой имел место в зоне чувствительности приемного преобразователя, то он будет преобразователем воспринят.

Скачкообразный характер роста трещины обоснован, в частности, в работе [16], в которой рассматривается процесс раскрытия отдельной произвольно ориентированной трещины, находящейся в поле двухосного сжатия, под действи-

ем нагнетаемой в нее жидкости. В ней показано, что при достижении давления в трещине критической величины  $P_{cr}$  трещина выходит из состояния равновесия и начинает расти. Так как скорость роста трещины значительно превышает скорость заполнения ее жидкостью, давление в трещине снижается и при достижении некоторой величины рост трещины прекращается [16]. Поскольку в соответствии с нелинейным законом фильтрации между давлением и темпом нагнетания жидкости в скважину существует функциональная связь [17], критическому значению давления нагнетания  $P_{cr}$  соответствует критическое значение темпа нагнетания  $q_{cr}$ .

Для контроля этого процесса одному «скачку» трещины будем противопоставлять один импульс АЭ, а интенсивность развития трещин будем характеризовать активностью АЭ – числом импульсов АЭ в единицу времени.

В работе [18] сделано предположение о том, что при нагнетании жидкости в скважину, пробуренную по углю, в общем случае могут развиваться не одна, а несколько однотипных (с примерно одинаковой ориентацией и начальной длиной) трещин. Для этого случая приведено решение задачи о количестве «скачков» (или импульсов АЭ)  $I$  при развитии трещины от начальной длины  $l_0$  до  $l$ , и о зависимости средней длины растущей трещины  $l$  от фильтрационно-коллекторских свойств горного массива:

$$I = nk \ln \frac{\ell}{\ell_0}, \quad (1)$$

где  $n$  – число одновременно развивающихся трещин;  $k$  – коэффициент, описывающий связь между  $l_0$  и  $l$ ;

$$\ell = \frac{q(2\sqrt{mK\Delta P\mu t} - \mu b)}{2\pi h m K \Delta P}, \quad (2)$$

где  $q$  – скорость нагнетания;  $h$  – средняя ширина поверхности трещин;  $m$ ,  $K$  – соответственно пористость и проницаемость горного массива;  $\Delta P = P_1 - P_2$ ,  $P_1$  – давление жидкости на стенке трещины;  $P_2$  – пластовое давление жидкости, примерно равное давлению свободного газа в трещине, если он имеется;  $b$  – среднее раскрытие трещин;  $\mu$  – динамическая вязкость нагнетаемой жидкости.

Формула (2) с относительной погрешностью, не превышающей 10% и стремящейся к нулю с ростом  $t$ , применима, если выполняется условие [18]:

$$t > t_n \approx \frac{2\mu b^2}{mK\Delta P}, \quad (3)$$



При следующих реальных параметрах гидрорыхления угольного пласта:  $\mu=1 \text{ сП}$ ;  $b=0.1 \text{ см}$ ;  $m=3-8\%$ ;  $K=0.1 \text{ мД}$ ;  $\Delta P=5-10 \text{ МПа}$  предельное минимальное время начала контроля  $t_n$  составляет  $25-130 \text{ с}$  (при наиболее часто регистрируемых параметрах эта величина составляет  $30-40 \text{ с}$ ). Формула (2) может использоваться при анализе этого процесса за исключением кратковременного начального периода, так как гидрорыхление угольного пласта осуществляется от нескольких десятков минут до нескольких часов и более.

Пористость песчаника соизмерима с пористостью угля [19], а проницаемость варьируется в очень широких пределах [20], но можно принять, что примерно на порядок ниже, чем у угля. При этом давление нагнетания, развиваемое насосом типа Т-200/32 Ех-Z, в несколько раз выше, чем давление жидкости при гидрорыхлении угольного пласта соответствующими насосными установками. Следовательно, время  $t_p$  при направленном гидроразрыве кровли из песчаника может быть лишь ненамного больше, чем время при гидрорыхлении угольного пласта. Таким образом, формула (2) (равно как и (1)) также применима при анализе гидроразрыва кровли, за исключением  $1-2 \text{ мин}$  в начале процесса. В этом случае при  $n=1$  общее время осуществления гидроразрыва кровли составляет  $5-10 \text{ мин}$ , а фиксация фактов скачкообразного роста трещин будет осуществляться независимо от выполнения неравенства (3).

При этих условиях рассмотрим возможность использования метода АЭ для определения оптимальных гидравлических параметров гидрообработки горного массива из горных выработок. Решение такой задачи для нагнетательных установок с регулируемой скоростью нагнетания (например, при регулируемом вентилем отбора воды из высоконапорного водовода на гидрошахтах при гидрорыхлении угольного пласта), обеспечивающей постоянное значение активности АЭ на оптимальном уровне, приведено в работе [21]. В данной работе приведем решение задачи применительно к насосным установкам с жесткой рабочей характеристикой ( $q \approx \text{const}$ ), т.е. покажем, как должна вести себя активность АЭ во времени, чтобы обеспечить контрольные параметры способа гидрообработки.

### Решение задачи

Будем считать, что при гидрообработке угольного пласта в режиме гидрорыхления и гидроразрыва кровли жидкость в скважину будет поступать до тех пор, пока вершина растущей трещины не достигнет поверхности ближайшей

выработки или скважины, пробуренной из нее. При гидрорыхлении угольного пласта этим минимальным расстоянием приближенно является глубина герметизации скважины. При гидроразрыве кровли пласта это расстояние зависит от технологии его осуществления. За минимальную величину примем расстояние до ближайшей обнаженной поверхности выработки. В обоих случаях эту величину обозначим  $l_0$ .

Подставив (2) в (1), определим общее количество  $I$  импульсов АЭ при развитии  $n$  трещин от начальной длины  $l_0$  до  $l$ .

$$I = nk \ln \left[ \frac{q(2\sqrt{mK\Delta P \mu t} - \mu b)}{2\pi h n l_0 m K \Delta P} \right]. \quad (4)$$

При организации контроля акустической эмиссии в процессе гидрообработки призабойного пространства следует учитывать следующее. Наличие в радиусе чувствительности геофона зон повышенного горного давления, в которых действующие напряжения эпизодически превышают предельные напряжения, приводит к динамической перестройке структуры горного массива, сопровождающейся развитием трещин даже в периоды, когда работы по ведению выработки приостановлены. Активность этого трещинообразования, как показал эксперимент, в течение некоторого времени, необходимого для гидрообработки горного массива, остается практически постоянной. Различить эти импульсы АЭ от импульсов, вызванных трещинами гидроразрыва, невозможно. Поэтому такую активность АЭ можно измерить до начала гидрообработки, назвать ее фоновой и в последующем вычитать из суммарной активности АЭ, регистрируемой в процессе гидрообработки.

Из (4) определим критический темп нагнетания  $q_{cr}$ , при достижении которого начинается процесс принудительного развития трещин. Поскольку  $nk \neq 0$ , условие  $I = 0$ , справедливое для  $P < P_{cr}$ , дает следующее значение:

$$q_{cr} = \frac{2\pi h n l_0 m K \Delta P}{2\sqrt{mK\Delta P \mu t} - \mu b}. \quad (5)$$

При направленном гидроразрыве кровли, как правило,  $n=1$ , выражение (5) определяет минимальный темп нагнетания, при котором эта технология может осуществляться.

Определим оптимальные гидравлические параметры нагнетания, при которых в скважину, имеющую фильтрующую часть длиной  $l_\phi$  и загерметизованную на глубину  $l_s$ , при постоянном темпе нагнетания до прорыва по трещинам

в выработку удается закачать объем жидкости  $Q$ .

При этих условиях темп нагнетания  $q$  и время нагнетания  $t$  связаны следующим соотношением:

$$q = \frac{Q}{t} \quad (6)$$

Прорыв жидкости в выработку может произойти не раньше, чем среднее значение полудлины развивающихся трещин становится примерно равным величине  $\ell_z$ . Подставив это условие и соотношение (6) в выражение (2), получим следующее квадратное уравнение относительно  $t$ :

$$t - \frac{Q\sqrt{\mu t}}{\pi h n \ell_{\Gamma} \sqrt{m k \Delta P}} + \frac{Q \mu b}{2 \pi h n \ell_{\Gamma} m k \Delta P} = 0 \quad (7)$$

Корни этого уравнения следующие:

$$t_{1,2} = \frac{Q^2 \mu}{(2 \pi h n \ell_{\Gamma})^2 m k \Delta P} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{2 \pi h n \ell_{\Gamma} b}{Q}} \right)^2 \quad (8)$$

Выражение (2) справедливо для любого  $t > t_n$ . Следовательно, и корни уравнения (7) должны удовлетворять этому условию.

Представим уравнение (2) с учетом соотношения (6) в виде:

$$\ell = \frac{d_1}{\sqrt{t}} - \frac{d_2}{t} \quad (9)$$

где  $d_1 = \frac{Q\sqrt{\mu}}{\pi h n \sqrt{m k \Delta P}}$  ;  $d_2 = \frac{Q \mu b}{2 \pi h n m k \Delta P}$

Графическое изображение зависимости вида (9) дано на рис. 1.

Функция  $\ell = \ell(t)$  вида (9) имеет максимум в точке

$$t_m = \left( \frac{2d_2}{d_1} \right)^2 \quad (10)$$

Подставив в (10) выражения для  $d_1$  и  $d_2$  и сравнив с выражением (3), получим  $t_n = 2t_m$ . Следовательно, корень  $t_1$ , находящийся левее точки  $t_m$ , не удовлетворяет условию  $t > t_n$  ни при каком  $Q$ .

Объем нагнетания  $Q$  до прорыва жидкости в выработку при гидрорыхлении пласта определяется темпом нагнетания. При очень высоких значениях  $q$  происходит быстрый рост трещин до плоскости забоя. При этом жидкость не успевает заполнить мелкие трещины и поры угля или

породы. По мере уменьшения  $q$  средняя скорость роста трещин уменьшается, растет время нагнетания до прорыва жидкости в выработку и, следовательно, возрастает объем жидкости, фильтрующейся в стенки трещин. Этим объясняется увеличение  $Q$  по мере снижения темпа нагнетания.

Таким образом, чтобы корень  $t_2$  удовлетворял условию  $t_2 > t_n$ , необходимо обеспечить достаточно большой объем нагнетания. Минимальный объем нагнетания  $Q_{\min}$ , при котором еще выполняется это условие, соответствует времени нагнетания  $t_2 = t_n$ . Найдем это значение из уравнения (2) при условиях  $\ell = \ell_z$ ;  $q = Q/t$ ;  $t = t_n$ :

$$Q_{\min} = \frac{4 \pi h b \ell_{\Gamma}}{2\sqrt{2} - 1} \quad (11)$$

Соответствующее значение темпа нагнетания определится из выражения:

$$q_{\max} = \frac{Q_{\min}}{t_n} \quad (12)$$

Подставим в (12) выражения (11) и (3), получим:

$$q_{\max} = \frac{2 \pi h \ell_{\Gamma} m k \Delta P}{(2\sqrt{2} - 1) \mu b} \quad (13)$$

Таким образом, при темпе нагнетания  $q_{cr} \leq q \leq q_{\max}$  все значения корня  $t_2$  уравнения (7) удовлетворяют условию  $t \geq t_n$ .

Для организации контроля режима гидрообработки по акустической эмиссии можно разбить все время нагнетания жидкости  $t$  на  $j$  равных интервалов контроля длительностью  $T$ , таких, что  $\tau_i < T < t_s$ , где  $\tau_i$  - длительность  $i$ -го импульса АЭ,  $t_s$  - суммарное время нагнетания в скважину до окончания способа гидрообработки, и характеризовать режим нагнетания параметром  $\Delta I$ , называемым активностью АЭ, равным числу импульсов АЭ в интервал контроля  $T$ :

$$\Delta I = \frac{\bar{a}}{\bar{a}} T \quad (14)$$

Из (4) имеем

$$\frac{\bar{a}}{\bar{a}} = \frac{nk\sqrt{m k \Delta P} \mu}{\sqrt{t}(2\sqrt{m k \Delta P} \mu t - \mu b)} \quad (15)$$

Преобразуем (15) с учетом (2), получим:

$$\frac{\bar{a}}{\bar{a}} = \frac{qk\sqrt{\mu}}{2\ell\pi h\sqrt{m k \Delta P} t} \quad (16)$$

Тогда искомая величина определится из выражения:

$$\Delta I = \frac{qkT\sqrt{\mu}}{2\ell\pi h\sqrt{m k \Delta P} t} \quad (17)$$

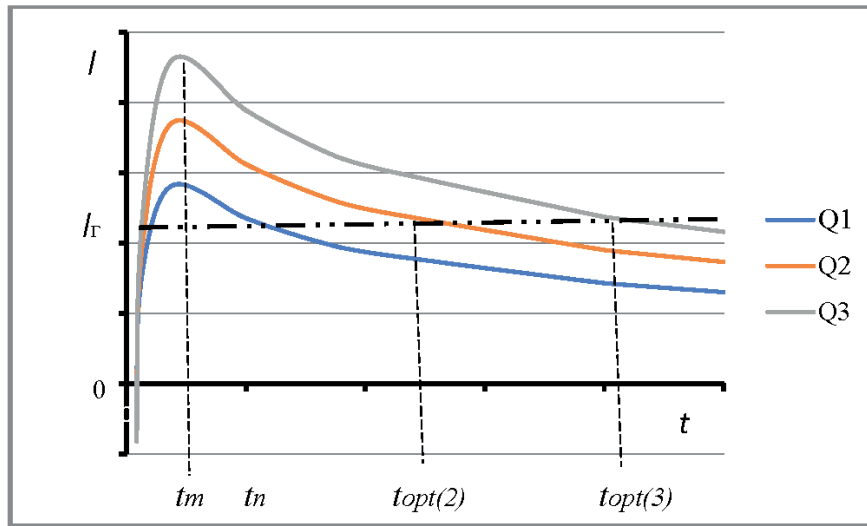


Рисунок 1 – Зависимость длины трещины  $l$  от времени нагнетания  $t$  при различных значениях объема нагнетания  $Q$ : 1, 2, 3 - соответственно при  $Q_1, Q_2, Q_3$ ;  $Q_3 > Q_2 > Q_1 = Q_{min}$

$t_{opt(2)}, t_{opt(3)}$  - оптимальное время нагнетания, при котором в скважину к моменту прорыва жидкости в выработку поступает объем жидкости соответственно  $Q_2$  и  $Q_3$

Figure 1 – Dependence of the crack length  $l$  on the infusion time  $t$  for different values of the infusion volume  $Q$ :

1,2,3, - correspondingly at  $Q_1, Q_2, Q_3$ ;  $Q_3 > Q_2 > Q_1 = Q_{min}$

$t_{opt(2)}, t_{opt(3)}$  - is the optimal infusion time at which, by the time the fluid breaks through into the mine opening, the fluid volume is  $Q_2$  and  $Q_3$

Из уравнения (6) определим оптимальное значение темпа нагнетания  $q_{opt}$ , которое достигается при  $t = t_2$  (см. уравнение (8)):

$$q_{opt} = \frac{mK\Delta P(2\pi h n l_r)^2}{Q\mu \left(1 + \sqrt{1 - \frac{2\pi h n l_r b}{Q}}\right)^2} \quad (18)$$

Нагнетание при таком темпе будет сопровождаться активностью АЭ, значение которой определим из выражений (14) и (15).

$$\Delta I_{opt} = \frac{kT n_{yo} l_\phi}{2t - b \sqrt{\frac{\mu}{mK\Delta P}}} \quad (19)$$

где  $n_{yo} = n / l_\phi$  - удельное число трещин, развивающихся из одного метра фильтрующей части скважины,  $m^{-1}$ .

Использование полученных уравнений для определения оптимальных параметров гидрорыхления угольного пласта, оптимального времени и темпа нагнетания, соответствующего оптимального значения активности АЭ требует знания большего числа параметров, характеризующих фильтрационно-коллекторские свойства угля, геометрические размеры, число трещин и пр. Экспериментальные замеры этих параметров трудоемки, обладают низкой точностью, а иногда и невозможны. Поэтому представляется целесообразным ввести в полученные уравнения интегральные коэффициенты, учитываю-

щие целый комплекс параметров, и определить их в результате опытного нагнетания.

Кроме того, уравнения (28) и (18) можно упростить аналитическим путем. Для этого рассмотрим множитель

$$\left(1 + \sqrt{1 - \frac{2\pi h n l_r b}{Q}}\right)^2 \quad (20)$$

В числителе дроби подкоренного выражения записана величина, пропорциональная суммарному объему полостей растущих трещин и соизмерима с минимальным объемом жидкости  $Q_{min}$ , который удастся закачать за время  $t_n$  при максимальном темпе нагнетания (см. формулу (11)). Поскольку гидрорыхление угольного пласта осуществляется при  $q < q_{max}$  и  $t \gg t_n$ , то большая часть нагнетаемой воды поступит в стенки растущих трещин (мелкие трещины и поры), а меньшая часть займет полости растущих трещин. Поэтому можно предположить, что  $2\pi h n l_r b / Q < 1$ . При этом справедливо следующее приближение [22]:

$$\sqrt{1 - 2\pi h n l_r b / Q} \approx 1 - \pi h n l_r b / Q \quad (21)$$

Тогда выражение (20) примет вид:

$$\left(1 + \sqrt{1 - \frac{2\pi h n l_r b}{Q}}\right)^2 \approx \frac{(2Q - \pi h n l_r b)^2}{Q^2} \quad (22)$$

Осуществив замену множителя в соответствии с (22), формулы (8) и (18) можно представить в следующем виде, удобном для практического использования:

$$t_{\text{opt}} = a(Q-V)^2; \quad (23)$$

$$q_{\text{opt}} = \frac{Q}{a(Q-V)^2}, \quad (24)$$

где  $a = a_1 a_2$ ;

$a_1 = \frac{\mu}{(\pi h n_{\text{yd}})^2 m K \Delta P}$  - коэффициент, определяемый фильтрационно-коллекторскими свойствами массива и параметрами нагнетания,  $\text{с} \cdot \text{м}^{-2}$ ;

$a_2 = (\ell_{\Gamma} \ell_{\Phi})^{-2}$  - технологический параметр,  $\text{м}^{-4}$ ;

$V = \frac{\pi}{2} h n_{\text{yd}} \ell_{\Gamma} \ell_{\Phi} b$  - коэффициент, пропорциональный суммарному объему растущих трещин,  $\text{м}^3$ .

#### Рекомендации по использованию результатов решения задачи

Активность АЭ, сопровождающая гидрорыхление угольного пласта с оптимальным темпом, определяется выражением (2.19). Однако для практического использования оно непригодно, поскольку не связывает в явном виде активность АЭ и гидравлические параметры нагнетания. В связи с этим рассмотрим возможность выражения оптимальной активности АЭ через гидравлические параметры. При этом, по видимому, следует учесть, что на различных этапах нагнетания жидкости в скважину вследствие изменения давления нагнетания количество участвующих в развитии трещин может изменяться. Кроме того, изменяются свойства увлажняемого массива. Поэтому в выражение (2.19) следовало бы ввести зависимости перепада давления  $\Delta P$  и числа трещин  $n$  от времени, однако аналитические выражения их неизвестны. В связи с этим для практического применения формулу (2.19) можно представить в следующем упрощенном виде:

$$\Delta I_{\text{opt}} = \frac{\delta_1(q)}{t - \delta_2(q)\sqrt{t}}, \quad (25)$$

$$\text{где } \delta_1(q) = \frac{nkT}{2}; \quad \delta_2(q) = \frac{b}{2} \sqrt{\frac{\mu}{mK\Delta P}} \quad (26)$$

Зависимость (25) справедлива при достаточно больших значениях  $t$ . При  $t$ , близком к  $(\delta_2)^2$ , где она имеет особенность, для  $\Delta I_{\text{opt}}$  она дает заведомо завышенные значения. Это является следствием упрощения, сделанного при выводе формулы (2).

Таким образом, для определения оптимальных гидравлических параметров гидрорыхления пласта при мониторинге процесса гидрообработки методом АЭ необходимо, прежде всего, по результатам опытного нагнетания определить коэффициенты в уравнениях (24) и (25). Зная их для требуемого объема закачки жидкости в скважину, с помощью уравнения (24) следует определить оптимальный темп нагнетания. После этого с помощью уравнения (25) для оптимального темпа нагнетания определяется оптимальная временная зависимость активности АЭ.

В последующем мониторинг гидрорыхления на данном участке пласта сводится к экспериментальному установлению такого давления и темпа нагнетания, при которых временная зависимость активности АЭ совпадает с оптимальной.

Нам представляется, что изложенная методика применима для организации мониторинга процесса гидрорасчленения угольного пласта, осуществляемого с земной поверхности через скважину с целью его заблаговременной дегазации [2]. В этом случае величина  $l_{\Gamma}$  определяется размерами подвергаемого гидрорасчленению участка угольного пласта по простиранию, а коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$  и  $V$  могут быть ориентировочно определены по результатам опытного гидрорыхления этого же пласта из выработки, примыкающей к участку, на котором планируется осуществить гидрорасчленение.

Для контроля гидроразрыва кровли акусто-эмиссионным методом на начальном этапе отработки лавы необходимо провести опытный гидроразрыв. При этом контроль процесса нужно осуществлять одновременно путем подсчета числа импульсов АЭ  $I_3$  и регистрации появления жидкости в соседней скважине, пробуренной на расстоянии  $l_3$  от скважины, из которой осуществляется гидроразрыв. По формуле (1) определить значение коэффициента  $k$  для данного участка горного массива  $k_3$ :

$$K_3 = \frac{I_3}{\ln\left(\frac{l_3}{l_0}\right)} \quad (27)$$

В дальнейшем в предположении о примерно постоянстве коэффициента  $k_3$  и начальной длины искусственно создаваемой трещины  $l_0$  для кровли над данной лавой можно оценивать длину  $l$  произведенной в процессе очередного гидроразрыва трещины по зарегистрированному числу импульсов АЭ  $I$  по формуле:

$$l = l_0 e^{I/k_3} \quad (28)$$

Предположив, что форма растущей трещины близка к круговой, можно следующим образом оценить ее площадь  $S$ :

$$S \approx \frac{\pi}{4} l_0^2 \exp(2I/k_3). \quad (29)$$

### Выводы

Приведенное решение задачи свидетельствует о том, что активность АЭ является количественной характеристикой интенсивности развития трещин в горном массиве в процессе его гидрообработки.

При низконапорном увлажнении активность АЭ не должна превышать фоновое значение, измеренное до начала нагнетания жидкости в горный массив.

При гидрорыхлении пласта активность АЭ приобретает дополнительную составляющую, которая определяется пористостью и водопроницаемостью пласта, вязкостью жидкости, перепадом давления жидкости от стенок трещин до фронта фильтрации, геометрическими размерами и углами ориентации развивающихся трещин, соотношением вертикальной и горизонтальной составляющих горного давления, механическими свойствами пласта и временем нагнетания.

Причем временная зависимость активности АЭ при постоянном темпе нагнетания такова, что при подъеме давления жидкости в скважине на начальном этапе она от фонового значения быстро возрастает до максимального, а затем снижается по мере увеличения размеров трещин и фильтрационного потока жидкости в их стенки. С увеличением темпа нагнетания уменьшается время до прорыва жидкости по растущим трещинам на забой и объем закачанной жидкости, а значения активности АЭ возрастают.

При направленном гидроразрыве кровли пласта длина растущей трещины связана с суммарным числом импульсов АЭ экспоненциальной зависимостью, что позволяет по измененному числу импульсов АЭ оценить длину и площадь растущей трещины.

**Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-17-01143).**

**The study was carried out through a grant from the Russian Science Foundation (project No. 17-17-01143).**

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Рос. акад. наук. Сиб. отд-ние, Ин-т горного дела. Новосибирск: Издательский дом «Новосибирский писатель», 2011. 524 с.
2. Ножкин Н.В. Заблаговременная дегазация угольных месторождений. М.: Недр, 1979. 271 с.
3. Клишин В.И., Опрук Г. Ю., Тащиенко А.Л. Применение поинтервального гидроразрыва угольного пласта для интенсификации пластовой дегазации // Научное издание «Технологии разработки и использования минеральных ресурсов»: Издательство: Сибирский государственный индустриальный университет Новокузнецк, №3, 2016, с. 33-39.
4. Инструкция по безопасному ведению горных работ на пластах, опасных по внезапным выбросам угля (породы) и газа (РД 05-350-00). Предупреждение газодинамических явлений в угольных шахтах (Сборник документов). М.: Государственное предприятие НТЦ по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. С. 120-303.
5. Чернов О.И., Пузырев В.Н. Прогноз внезапных выбросов угля и газа. М.: «Недра», 1979. 296 с.
6. Логинов Г.Н., Яскевич С.В., Дучков А.А., Сердюков А.С. Совместная обработка данных поверхностных и подземных систем микросейсмического мониторинга при добыче твердых полезных ископаемых // ФТПРПИ. 2015. № 5. С.100-107.
7. Клишин В.И. Методы направленного гидроразрыва труднообрушающихся кровель для управления горным давлением в угольных шахтах / В.И. Клишин [и др.] // Уголь. 2008. № 11. С.12-16.
8. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Инструкция по прогнозу динамических явлений и мониторингу массива горных пород при отработке угольных месторождений». Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15.08.2016 г. №339. 129 с.
9. Инструкция по выбору способа и параметров разупрочнения кровли на выемочных участках / колл. авт. Л.: ВНИМИ. 1991. 102 с.
10. Клишин В.И., Опрук Г.Ю., Сентюров А.В., Николаев А.В. Опыт применения направленного гидроразрыва основной кровли при выходе механизированного комплекса из монтажной камеры // Уголь. 2015. № 11. С. 12-16.
11. Установка для нагнетания воды в угольный пласт УН35 [Электронный ресурс]. URL: [http://sinref.ru/000\\_uchebniki/01701gornoe\\_delo/004\\_spr\\_mashini\\_i\\_oborudovanie\\_dla\\_ugolnih\\_shaht\\_horin\\_1987/188.htm](http://sinref.ru/000_uchebniki/01701gornoe_delo/004_spr_mashini_i_oborudovanie_dla_ugolnih_shaht_horin_1987/188.htm) дата 3.05.2017 (дата обращения 3.05.2017).
12. Установка насосная для нагнетания воды в угольные пласты УНВ-2М [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sibinfo.org/gidravlika/products/undnvup.htm> (дата обращения 3.05.2017).
13. Насосы типа Т [Электронный ресурс]. URL: <http://promenergochim.ru/static/doc/0000/0000/0217/217186.4fo7ytayvm.pdf> (дата обращения 21.04.2017).
14. Грешников В.А., Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. Применение для испытаний материалов и изделий. М.:

- Изд-во стандартов, 1976. 272 с.
15. Бреховских Л.М. Волны в слоистых средах. М.: Наука, 1973. 343 с.
  16. Москалев А.Н., Васильев Л.М., Млодецкий В.Р. Предельное равновесие трещин в угольном пласте при нагнетании в него жидкости // ФТПРПИ. 1979. № 5. С. 91-96.
  17. Чернов О.И., Розанцев Е.С. Подготовка шахтных полей с газовойброопасными параметрами. М.: Недра, 1975. 287 с.
  18. Шадрин А.В. Сейсмоакустическая реакция угольного массива на процесс его гидрообработки // ФТПРПИ. 1982. № 6. С. 29-34.
  19. Геомеханика: учебное пособие / П.В. Егоров [и др.]. Кемерово: Кузбассвуиздат, 2001. 276 с.
  20. Водопроницаемость различных грунтов (по Н.Н. Маслову) [Электронный ресурс]. URL: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C\\_%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2) (дата обращения 3.05.2017).
  21. Шадрин А.В. Акусто-эмиссионный мониторинг профилактики гидрообработки угольных пластов // ФТПРПИ. 2000. № 5. С. 98-102.
  22. Градштейн И.С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. М.: Наука, 1971. 1108 с.

## REFERENCES

1. Klishin, V. I., Zvorygin, L. V., Lebedev, A. V., & Savchenko, A. V. (2011). *Problemy bezopasnosti i novyye tekhnologii podzemnoy razrabotki ugol'nykh mestorozhdeniy* [Problems of safety and new technologies for underground mining of coal deposits]. Novosibirsk: Novosibirskiy pisatel' - The Novosibirsk writer. [In Russian]
2. Nojkin, N. V. (1979). *Zablagovremennaya degazatsiya ugol'nykh mestorozhdeniy* [Advanced degassing of coal deposits]. Moscow: Nedra. [In Russian].
3. Klishin, V. I., Opruk, G. Y., & Tatsienko, A. L. (2016). *Primeneniye pointerval'nogo gidrorazryva ugol'nogo plasta dlya intensivatsii plastovoy degazatsii* [The use of intermittent hydraulic fracturing of a coal seam to intensify formation degassing]. *Naukoyemkiye Tekhnologii Razrabotki I Ispol'zovaniya Mineral'nykh Resursov - High Technology of Development and Use of Mineral Resources*, (3), 33-39. [In Russian]
4. *Instruktsiya po bezopasnomu vedeniyu gornykh работ na plastakh, opasnykh po vnezapnym vybrosam uglia (porody i gaza (RD 05-350-00). Preduprezhdeniye gazodinamicheskikh yavleniy v ugol'nykh shakhtakh (Sbornik dokumentov). [Instructions for the safe management of mining operations on formations that are dangerous for sudden releases of coal (rock) and gas (RD 05-350-00). Prevention of gas-dynamic phenomena in coal mines (Collection of documents)], Gosudarstvennoye predpriyatiye NTTs po bezopasnosti v promyshlennosti Gosgortekhnadzora Rossii - The State Enterprise of the SEC for Safety in Industry of the Gosgortekhnadzor of Russia (2000). [In Russian]*
5. Chernov, O. I., & Puzyrev, V. N. (1979). *Prognoz vnezapnykh vybrosov uglia i gaza* [Forecast of sudden emissions of coal and gas]. Moscow: Nedra. [In Russian].
6. Loginov, G. N., Yaskevich, S. V., Duchkov, A. A., & Serdjukov, A. S. (2015). *Sovmestnaya obrabotka dannykh poverkhnostnykh i podzemnykh sistem mikroseymsicheskogo monitoringa pri dobyche t verdykh poleznykh iskopayemykh* [Joint processing of data of surface and underground microseismic monitoring systems for the extraction of solid minerals]. *FTPRPI*, (5), 100-107. [In Russian.]
7. Klishin, V. I. (2008). *Metody napravlennogo gidrorazryva trudnoobrushayushchikhsya krovel' dlya upravleniya gornym davleniyem v ugol'nykh shakhta* [Methods of directional fracturing of hard-to-break roofing to control mining pressure in coal mines]. *Ugol - Coal*, (11), 12-16. [In Russian].
8. *Federal'nyye normy i pravila v oblasti promyshlennoy bezopasnosti «Instruktsiya po prognozu dinamicheskikh yavleniy i monitoringu massiva gornykh porod pri otrabotke ugol'nykh mestorozhdeniy»* [Federal norms and rules in the field of industrial safety "Instruction on the forecast of dynamic phenomena and monitoring of the rock massif in coal mining"], Order of the Federal Service for Ecological, Technological and Nuclear Supervision of August 15, 2016 No. 339 (2016). [In Russian].
9. VNIMI. (1991). *Instruktsiya po vyboru sposoba i parametrov razuprochneniya krovli na vvyemochnykh uchastkakh* [Instructions on the choice of the method and parameters of softening of the roof at the excavation sites]. Leningrad: VNIMI. [In Russian].
10. Klishin, V. I., Opruk, G. Y., Sentyurev, A. V., & Nikolaev, A. V. (2015). *Opyt primeneniya napravlennogo gidrorazryva osnovnoy krovli pri vykhode mekhanizirovannogo kompleksa iz montazhnoy kamery* [Experience in applying directed hydraulic fracturing of the main roof at the exit of the mechanized complex from the installation chamber]. *Ugol - Coal*, (11), 12-16. [In Russian].
11. *Ustanovka dlya nagnetaniya vody v ugol'nyy plast UN35* [Installation for water injection into coal seam UN35]. (n.d.). Retrieved May 03, 2017, from [http://sinref.ru/000\\_uchebniki/01701gornoe\\_delo/004\\_spr\\_mashini\\_i\\_oborudovanie\\_dla\\_ugolnih\\_shah\\_t\\_horin\\_1987/188.htm](http://sinref.ru/000_uchebniki/01701gornoe_delo/004_spr_mashini_i_oborudovanie_dla_ugolnih_shah_t_horin_1987/188.htm) [In Russian].
12. *Ustanovka nasosnaya dlya nagnetaniya vody v ugol'nyye plasty UNV-2M* [Pumping unit for water injection into coal seams UNV-2M]. (n.d.). Retrieved May 03, 2017, from <http://www.sibinfo.org/gidravlika/products/undnvup.htm>.
13. *Nasosy tipa T - Pumps of type T*. (n.d.). Retrieved April 21, 2017, from <http://promenergochim.ru/static/doc/0000/0000/0217/217186.4fo7ytayvm.pdf> [In Russian].
14. Greshnikov, V. A., & Drobot, Y. B. (1976). *Akusticheskaya emissiya. Primeneniye dlya ispytaniy materialov i izdeliy* [Acoustic emission. Application for testing of materials and products]. Moscow: Izdatel'stvo standartov. [In Russian].
15. Brekhovskikh, L. M. (1973). *Volny v sloistykh sredakh* [Waves in layered media]. Moscow: Nauka. [In Russian].
16. Moskaev, A. N., Vasil'ev, L. M., & Mlodetskiy, V. P. (1979). *Predel'noye ravnovesiye treshchin v ugol'nom plaste pri nagnetanii v nego zhidkosti* [Limiting equilibrium of cracks in a coal seam when injecting liquid into it]. *FTPRPI*, (5), 91-96. [In Russian].
17. Chernov, O. I., & Rozantsev, E. S. (1975). *Podgotovka shakhtnykh poley s gazovybrosopasnymi parametrami* [Preparation of mine fields with gas-vysokopasnymi parameters]. Moscow: Nedra. [In Russian].

18. Chernov, O. I., & Rozantsev, E. S. (1975). *Podgotovka shakhtnykh poley s gazovybrosoopasnymi parametrami* [Preparation of mine fields with gas-vysokopasnymi parameters]. Moscow: Nedra. [In Russian].
19. Egorov, P. V. (2001). *Geomekhanika: Uchebnoye posobiye* [Geomechanics: A tutorial]. Kemerovo: Kuzbassvuzdat. [In Russian].
20. Vodopronitsayemost' razlichnykh gruntov (po N.N. Maslovu) [Water permeability of various soils (according to NN Maslov)]. (2018, March 15). Retrieved May 03, 2017, from [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C\\_%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%B4%D0%BE%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%86%D0%B0%D0%B5%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D0%B3%D1%80%D1%83%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2) [In Russian].
21. Shadrin, A. V. (2000). Akusto-emissionnyy monitoring profilaktiki gidroobrabotki ugol'nykh plastov [Acousto-emission monitoring of prevention of hydrotreatment of coal seams]. *FTPRPI*, (5), 98-102. [In Russian].
22. Gradstein, I. S., & Ryjik, I. M. (1971). *Tablitsy integralov, summ, ryadov i proizvedeniy* [Tables of integrals, sums, series, and products]. Moscow: Nauka. [In Russian].

## ООО «ВОСТЭКО»

осуществляет проведение научно-исследовательских работ, создание нормативной документации и другие работы в сфере промышленной безопасности на предприятиях угольной отрасли:

**экспертиза промышленной безопасности;**  
**услуги испытательной лаборатории;**  
**разработка инновационных технологий в сфере угледобычи,**  
**выпуск конструкторской документации для их единичного и серийного применения;**  
**патентные исследования;**  
**организация технического обслуживания, ремонта, поверки средств измерений и вспомогательного оборудования,**  
**издание научно-технического журнала «Вестник»,**  
**очная аспирантура.**

Россия, г Кемерово,  
 650002 Сосновый бульвар,  
 1, Кузбасский технопарк  
 tsot.company@gmail.com  
 тел/факс: 8 (3842) 340670  
**indsafe.ru**



## ООО «ГОРНЫЙ-ЦОТ»

серийно производит приборы контроля параметров безопасности рудничной атмосферы угольных шахт

**выпускает приборы контроля параметров безопасности:**

- **ПКА-01** Прибор контроля запыленности воздуха,
- **ПКП** Прибор контроля пылевзрывобезопасности горных выработок,
- **ИЗСТ-01** Стационарный измеритель запыленности,
- **GaSense** Портативный газоанализатор,
- **GaSos** Стационарный анализатор контроля параметров атмосферы заперемычного пространства,
- **СКП ДС** Система контроля параметров дегазационной сети

**разрабатывает системы измерения климатических параметров рудничной атмосферы (температуры; влажности; скорости и направления движения воздуха; давления);**  
**разрабатывает программное обеспечение для встраиваемых систем;**

**разрабатывает приборы по индивидуальным заказам;**  
**производит ремонт выпускаемых приборов.**



■ П. Б. Герике // P. B. Gerike  
am\_besten@mail.ru

канд. техн. наук, доцент, старший научный сотрудник лаборатории ФГБНУ «ФИЦ УУХ СО РАН», 650065, г. Кемерово, Ленинградский проспект, 10  
candidate of technical sciences, assistant professor, senior researcher of laboratory of Federal Research Center of Coal and Coal Chemistry of SB RAS, Kemerovo, Russia, 10, Leningradsky Avenue, Kemerovo, 650065, Russia

УДК 53.083(430.1)

## ПОИСК УНИВЕРСАЛЬНОГО КРИТЕРИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ СТЕПЕНИ ДЕГРАДАЦИИ ФАКТИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ГЕНЕРАТОРНЫХ ГРУПП ЭКСКАВАТОРОВ-ДРАГЛАЙНОВ A UNIVERSAL CRITERION SEARCH FOR ASSESSING THE DRAGLINE GENERATOR GROUPS' ACTUAL STATE DEGRADATION DEGREE

В настоящей статье приведены результаты исследований в области поиска универсального вибродиагностического критерия, пригодного для выполнения оценки степени деградации фактического состояния генераторных групп экскаваторов-драглайнов. Данные исследования осуществлены на основе комплексного анализа параметров вибрации и использования единых диагностических критериев, пригодных для разработки математических деградационных моделей изменения состояния сложных механических систем. Проведенный анализ диагностических данных, полученных на работающем энерго-механическом оборудовании экскаваторов – драглайнов, позволил осуществить классификацию дефектов данного типа оборудования по базовым группам, которым в совокупности соответствует более ста двадцати диагностических признаков в области анализа параметров вибрации, и провести их формализацию для удобства использования при разработке кода алгоритма автоматизированного контроля сложных систем по параметрам генерируемых механических колебаний. Разработанный комплекс диагностических правил выявления дефектов по результатам анализа параметров механических колебаний и создаваемые единые диагностические критерии оценки состояния, основанные на анализе параметров механических колебаний, могут выступить в качестве базовой платформы для реализации элементов системы обслуживания техники по ее фактическому техническому состоянию. В данной статье наглядно показано, что только с широким использованием современных методов вибрационной диагностики и неразрушающего контроля предоставляется возможность для своевременного выявления дефектов оборудования горных машин и разработки прогнозных моделей изменения их технического состояния. Полученные в рамках настоящей работы научные результаты беспрецедентно доказывают принципиальную состоятельность разрабатываемого нового критерия для оценки степени деградации фактического состояния генераторных групп экскаваторов-драглайнов, основанного на принципе комплексной реализации группы предложенных единых диагностических критериев. Применение на практике нового критерия повысит эффективность прогнозирования процесса изменения диагностических параметров преобразовательных агрегатов и малых генераторных групп экскаваторов - драглайнов.

*This article presents the results of research in the area of a universal vibrodiagnostic criterion search suitable for assessing the dragline generator groups' actual state degradation degree. This search was carried out on the vibration parameters' comprehensive analysis basis and common diagnostic criteria use suitable for the development of complex mechanical systems state change mathematical degradation models. The analysis of the diagnostic data obtained on dragline working power-mechanical equipment allowed to classify this type equipment defects into the basic groups, to which in the aggregate correspond more than one hundred and twenty diagnostic features in the analysis of vibration parameters. In addition, these signs were formalized to ease their use when developing the complex systems automated control algorithm code based on the generated mechanical vibration parameters.*



*The developed set of diagnostic rules for detecting defects based on the analysis of mechanical vibration parameters and the unified diagnostic criteria for estimating the state based on the mechanical vibrations parameters analysis can act as a basic platform for the implementation of the maintenance system elements according to its actual technical condition. In this article it is convincingly proved that only with the wide use of vibration diagnostics modern methods and non-destructive testing we get the opportunity for mining machines' equipment timely defect detection and development of predictive models for their technical condition change. The scientific results obtained within the frames of the present work categorically prove the principled consistency of the new criterion being developed for assessing the dragline generator groups actual state degradation degree based on a proposed unified diagnostic criteria group complex realizing principle. The application of the new criterion in practice will improve the forecast efficiency of mine draglines' converter units and small generator groups diagnostic parameters changing process.*

**Ключевые слова:** ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ТРАВМАТИЗМ, ОХРАНА ТРУДА, НЕСЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ НА ПРОИЗВОДСТВЕ, СМЕРТЕЛЬНЫЙ ТРАВМАТИЗМ, ДОБЫЧА УГЛЯ ОТКРЫТЫМИ ГОРНЫМИ РАБОТАМИ

**Key words:** INDUSTRIAL TRAUMATISM, LABOR PROTECTION, INDUSTRIAL ACCIDENT, FATAL TRAUMATISM, OPENCAST COAL MINING

Значительная часть электрических карьерных экскаваторов, эксплуатируемых сегодня на угольных и горнорудных предприятиях Кузбасса, отработала свой нормативный срок, до 25% из этих технических устройств находятся в недопустимом техническом состоянии [1]. Фактическое техническое состояние эксплуатируемого оборудования напрямую влияет на безопасность проведения горных работ, непроизводительные простои и количество несчастных случаев на производстве.

В основу настоящей работы положены результаты анализа параметров вибрации энерго-механического оборудования драглайнов, полученные при обследовании выборки из 30 экскаваторов (ЭШ 10/70, ЭШ 6/45, ЭШ 11/70, ЭШ 15/90) в период с 2004 по 2017 год. Интервал обследований составлял от одного до трех раз в три года, вибродиагностические работы выполнялись в рамках процедуры экспертизы промышленной безопасности технических устройств, эксплуатируемых на опасных производственных объектах. Анализ полученных данных позволяет заключить, что в недопустимом техническом состоянии сегодня находится до 30% от общего числа обследованных экскаваторов типа драглайн.

Результаты анализа диагностических характеристик позволили сделать вывод о широком распространении на генераторных группах электрических экскаваторов большого числа типовых дефектов, развитие которых вполне может стать причиной аварийного выхода машины из строя, среди таковых в порядке убывания распространенности, можно выделить следующие:

- нарушение жесткости системы;
- дефекты подшипников качения (повреждения наружного и внутреннего

колец, сепаратора, изменение формы тел качения, нарушение режима смазки) и ослабление их посадки;

- расцентровка валопровода агрегата;
- дефекты элементов соединительных муфт;
- дисбаланс ротора сетевого двигателя/генератора;
- дефекты электрической природы.

Исследованиями [2, 3] доказано, что только применение результатов комплексного диагностического подхода к анализу параметров вибрации позволяет повысить эффективность и достоверность получаемых результатов. Кроме того, только расширив диапазон измерений до 7...10 кГц по параметру виброускорения можно в значительной мере решить задачу осуществления полного контроля фактического состояния преобразовательных агрегатов и малых генераторных групп экскаваторов – драглайнов. Ниже на реальных примерах рассмотрены некоторые результаты анализа параметров виброакустических волн, генерируемых при работе энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов (см. рисунки 1 – 4).

Большинство диагностических признаков, подвергшихся формализации, сосредоточены в области прямого спектрального анализа параметров виброакустических волн. Этот факт объясняется наличием дополнительных сложностей в алгоритмизации наборов признаков и правил для выявления дефектов с применением других диагностических методологий, использование которых зачастую является необходимым только тогда, когда получен неявный результат диагностирования или для подтверждения правильности уже поставленного диагноза.

На сегодняшний день в мире не существу-

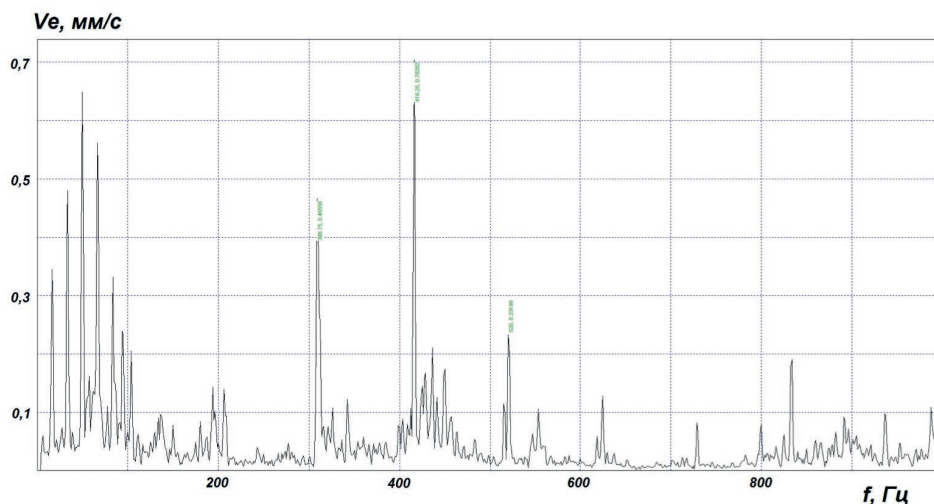


Рисунок 1 - Множественные дефекты подшипника сетевого двигателя ЭШ 11/70  
Figure 1 - ESh 11/70 motor bearing multiple defects

ет универсального диагностического критерия, при помощи которого можно оценить фактическое состояние сложной механической системы. Причины этого заключаются в недостаточной изученности вопросов динамики горных машин, ограниченном объеме баз данных по параметрам вибрации однотипного энерго-механического оборудования, сложностью анализа регистрируемых характеристик. Принципиальное отличие настоящей работы заключается в том, что здесь впервые предложена идея о создании базового критерия для диагностики энерго-механического оборудования карьерных экскаваторов, основанного на комплексном использовании единых диагностических критериев, каждый из которых предназначен для диагностирования только лишь одной отдельной группы дефектов (на примере генераторных групп это будут – дефекты подшипников качения, дефекты электрической природы, дефекты соединительных муфт, крепежа, дефекты центровки и балансировки). Уникальность предложенного критерия заключается в том, что его реализация на практике позволит избежать значительных трудозатрат и потерь времени, связанных с использованием для анализа параметров вибрации большого числа громоздких диагностических признаков и правил.

К наиболее распространенной группе дефектов генераторных групп экскаваторов-драглайнов относят повреждения подшипников качения, среди которых выделяют раковины и задиры на наружных и внутренних кольцах, трещины сепараторов, гранность и износ тел качения, нарушение режима смазки, ослабление посадки и увеличение эксплуатационных зазоров. Дефекты этой группы являются наиболее изученными с точки зрения решения задач практического виброанализа, для их идентификации

разработано как большое количество диагностических признаков, так и полноценных методов, ориентированных на контроль технического состояния подшипников (например, метод ударных импульсов, пик-фактор, анализ огибающей и т.д.). По данной группе дефектов накоплено большое количество статистических данных, что позволило ряду авторов с использованием специализированных критериев и признаков предпринять попытки по созданию единых диагностических критериев, пригодных для выполнения оценки фактического состояния и расчета прогноза деградации подшипников [4, 5].

На представленном ниже рисунке приведен реальный спектр, иллюстрирующий одновременное наличие нескольких наиболее распространенных дефектов на примере подшипника, установленного на сетевом двигателе.

В частности, в спектре, представленном на рисунке 1, присутствуют гармонические составляющие на сепараторной частоте, а также частотах, отвечающих за дефекты внешней обоймы и наличие повреждений на телах качения подшипника. Амплитудный вклад отдельных составляющих по параметру виброскорости незначителен, максимумы амплитуд значащих гармоник едва достигают величин около 0,7 мм/с. Однако, использование комплексного подхода к оценке фактического состояния (в частности, оценки по общему уровню виброускорения и анализа огибающей) позволило классифицировать состояние подшипника как недопустимое и обосновать его экстренную замену. Результаты визуального контроля, проведенного в процессе демонтажа, подтвердили правильность сделанных выводов и рекомендаций по замене дефектного узла.

Результаты комплексного подхода к диа-

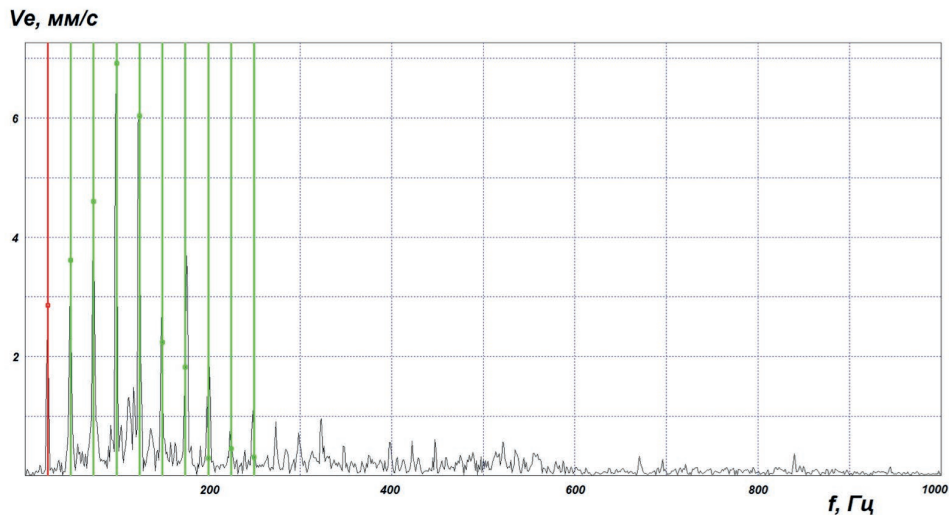


Рисунок 2 - Нарушение жесткости системы на генераторе подъема экскаватора ЭШ 6/45  
 Figure 2 - Excavator ESh 6/45 hoist generator system rigidity malfunction

гностике параметров вибрации позволили разработать единый диагностический критерий для диагностирования подшипников, в основу которого положены четыре основополагающих признака – общий уровень подшипниковых гармоник по параметру виброускорения, общий уровень профильтрованного сигнала виброускорения, мера сходства сигналов по спектру огибающей, а также результаты реализации алгоритма высокочастотного эксцесса [6, 7, 8].

На втором месте по распространенности среди дефектов генераторных групп экскаваторов-драглайнов находится нарушение жесткости системы [1]. Данный дефект может проявлять себя большим числом диагностических признаков, причем частотные составляющие, порожденные наличием данного дефекта, нередко совпадают со значащими гармониками, которым соответствуют повреждениям совершенно иной природы (нарушение центровки, дефекты соединительных муфт), что может значительно усложнить выполняемый анализ. Наиболее распространенным примером, наглядно иллюстрирующим наличие данного дефекта, является наличие в спектре специфического гармонического ряда оборотной частоты, который может состоять из более чем десятка ярко выраженных составляющих (см. рисунок 2).

Данный дефект является провоцирующим фактором, приводящим к росту общего уровня вибрации и появлению, в ряде случаев, паразитных резонансных частот. Этот фактор, как самостоятельный, так и в сочетании с причинами иного характера, может привести к возникновению нарушения центровки валопровода агрегата, что, в свою очередь, приводит к следующим основным проблемам: ускоренному износу элементов со-

единительных полумуфт, преждевременному выходу из строя подшипников качения, повреждению элементов конструкции валопровода.

Помимо прочего, одним из распространенных дефектов электрических машин, является дисбаланс ротора электродвигателя/генератора. Среди других этот дефект выделяет его способность к генерированию мощных низкочастотных колебаний, энергия которых может быть такова, что произойдет ослабление крепежа, нарушение центровки, и, наконец, возможен отрыв агрегата от опор и его самопроизвольное смещение. Анизотропия материалов, применяемых в конструкции электрических машин, накладывает ряд условий на процесс распространения виброакустических волн при возникновении дисбаланса. Признаки дисбаланса должны присутствовать во всех направлениях пространственного положения агрегата, только это может служить надежным фактором, подтверждающим наличие развитого дефекта. В то же время, в ряде случаев может преобладать горизонтальная компонента вибрации, которая наиболее четко проявляется при работе агрегата с жестким ротором, что также является дополнительным косвенным признаком наличия неуравновешенности ротора электрической машины.

Одновременное присутствие на преобразовательном агрегате драглайна нескольких развитых высокоэнергетических колебательных процессов, таких как развитый дисбаланс ротора и нарушение центровки валопровода, неминуемо приведет к значительному росту величин параметров вибрации, что способствует переходу всей машины в недопустимое техническое состояние с высокой вероятностью возникновения аварийных ситуаций (см. пример на рисунке 3).

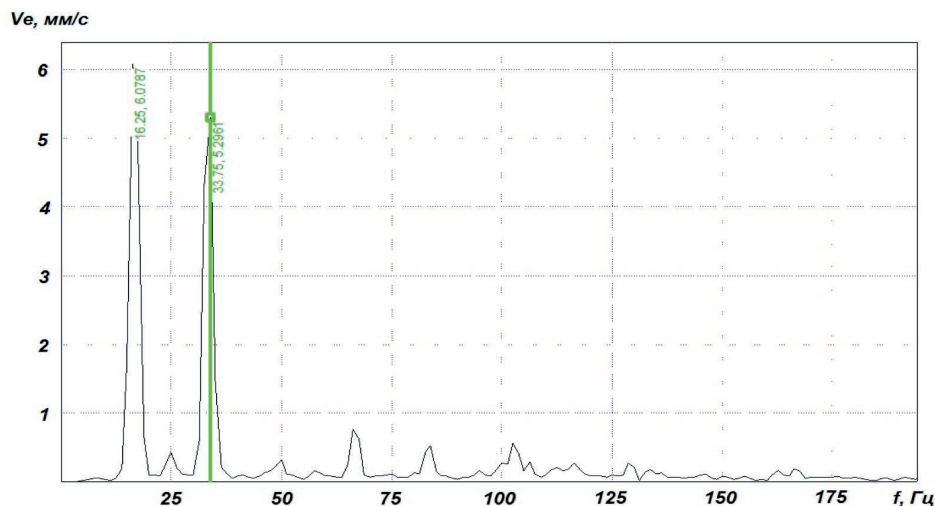


Рисунок 3 - Расцентровка валопровода генераторной группы, дисбаланс ротора генератора поворота экскаватора ЭШ 15/90

Figure 3 - Excavator ESh 15/90 generator group shafting misalignment, swing generator rotor imbalance

Применение результатов комплексного подхода к диагностике параметров механических колебаний позволяет дать эффективную оценку явлению дисбаланса теплового типа, который достаточно часто встречается на генераторных группах экскаваторов – драглайнов. Исследованиями доказано [9, 10, 11], что тепловой неуравновешенности ротора присущи все основные признаки механического дисбаланса, с той разницей, что каждому определенному тепловому режиму соответствует своя, специфичная по уровню и составу, вибрация. В этом случае наиболее корректным признаком наличия тепловой неуравновешенности является отношение амплитуд значащих гармоник при выбеге нагретого ротора по отношению к величинам этих компонент при разгоне холодного ротора [12].

Кроме того, при решении задачи о подтверждении наличия теплового дисбаланса необходимо учитывать, что аналогичными диагностическими признаками обладают и некоторые другие механические дефекты. Так, на гармонический состав спектра при наличии нарушения соосности валов или при структурном резонансе существенное влияние часто оказывают величины температурных полей работающего агрегата. Присутствие на генераторных группах экскаваторов-драглайнов множественных дефектов механической, тепловой и электрической природы приводит к тому, что специалистами фиксируются уровни эффективного среднеквадратического значения виброскорости порядка 30...50 мм/с и выше, что превышает предельно допустимую величину в 3...5 и более раз [13] и является предпосылкой к созданию аварийных ситуаций, представляющих реальную угрозу жизни и здоровью

бригаде экскаватора и обслуживающего персонала.

Выполненные ранее исследования в области комплексного анализа параметров вибрации [1, 13, 14] показали, что для диагностики технического состояния генераторных групп наиболее эффективным является сочетание спектрального анализа в расширенном частотном диапазоне, эксцесса и анализа огибающей. Иногда к указанной совокупности методов целесообразно добавить анализ характеристики разгона/выбега агрегата и вейвлет преобразование сигнала. Реализация методологии анализа траектории/процессии движения ротора значительно увеличивает число диагностических правил и время, затрачиваемое на проведение контроля, кроме того, сложность проводимого анализа существенно возрастает [15]. Именно поэтому было принято решение ограничиться данной группой методов при разработке единого диагностического критерия оценки фактического состояния генераторных групп экскаваторов – драглайнов.

Такой критерий должен включать в себя совокупность единых критериев, число которых равняется количеству групп базовых дефектов, присущих рассматриваемому оборудованию. В случае диагностирования генераторных групп таких критериев понадобится минимум пять – для диагностики подшипников, нарушения жесткости системы и центровки валопровода агрегата, неуравновешенности вращающихся деталей, дефектов соединительных полумуфт и дефектов электрической природы. Каждый из перечисленных единых диагностических критериев должен быть основан на своем, уникальном, наборе диагностических признаков и правил. Так,

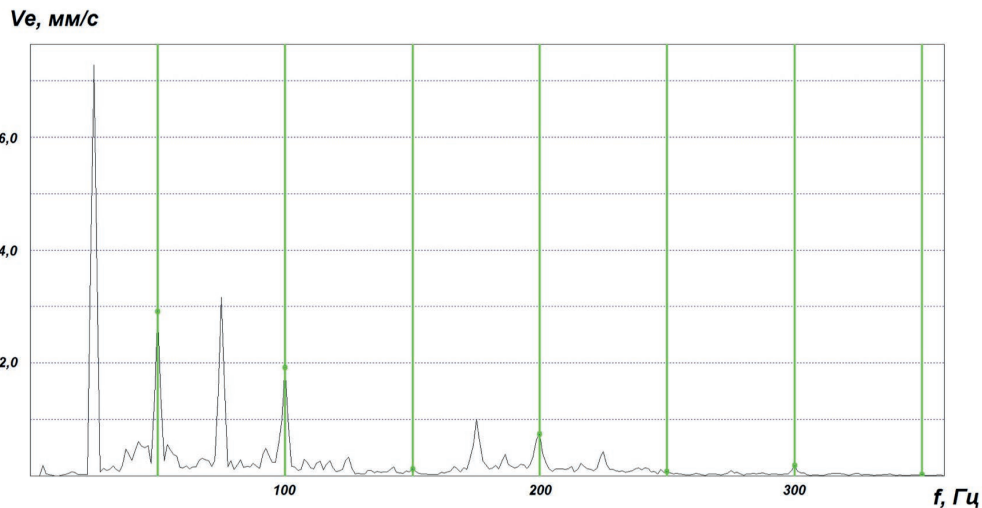


Рисунок 4 - Замыкание обмоток генератора подъема экскаватора ЭШ 6/45  
Figure 3 - Excavator ESh 6/45 hoist generator windings fault

в частности, проведенные исследования [1, 13] позволили предложить обоснованный набор методологий для формирования обобщенного критерия для выявления дефектов электрических машин, включая такие дефекты, как дисбаланс тел вращения, межвитковые замыкания обмотки ротора (см. рисунок 4) или смещение в магнитном поле и т.д. Еще три единых критерия (нарушение жесткости системы и расцентровка, дисбаланс, дефекты полумуфта) только предстоит разработать, для чего потребуются дальнейший сбор информации и проведение дополнительных исследований.

Анализ полученных диагностических данных позволил формализовать пять базовых признаков оценки состояния по параметрам вибрации, пригодных для создания единого диагностического критерия, предназначенного для выявления дефектов электрической природы на генераторных группах экскаваторов – драглайнов:

1. Значительное превышение величины суммы амплитуд составляющих гармонического ряда частот питающей сети в момент работы агрегата в штатном режиме над той же величиной, но измеренной сразу после отключения электрической энергии ( $\sum A^{k:f_{\text{ДЛ}}} >> \sum A^{k:f_{\text{ДЛ}}*}$ ).

2. Гармоническая активность на удвоенной частоте питающей сети и первой гармонике оборотной частоты (при условии наличия боковых частот прохода поля), свидетельствующая об изменении воздушного зазора между статором и ротором в процессе работы агрегата (вращающийся эксцентриситет ротора).

3. Нарушение симметрии магнитного потока, что выражается через генерацию составляющих спектра на частоте скольжения, являющейся разностью частот вращения магнитного поля

и оборотной частоты ротора (свидетельствует о наличии межвитковых замыканий в обмотке ротора).

4. Глубина модуляции спектра огибающей вибросигнала в области ряда частот питающей сети, а также наличие в спектре субгармоник на боковых полосах частоты прохождения поля вокруг ряда оборотной частоты  $k:f_R \pm n:f_p$ , подтверждающих наличие повреждений стержней ротора.

5. Мера подобия, определяемая по результатам сравнения характеристик вейвлет-преобразования и временной волны реального и «эталонного» сигналов.

Реализация процедуры клиппирования потребовала решения практической задачи, связанной с очисткой спектра от «лишних» гармоник. Алгоритм выделения информативных составляющих дефектов электрической природы, примененный в рамках настоящего исследования, основывается на удалении из спектра всех «лишних» гармонических составляющих, в нем использована предложенная в работах [8] процедура уточнения оборотной частоты вращения, основанная на принципе поиска составляющих спектра с максимальными амплитудами в низкочастотном диапазоне, зарекомендовавшая себя в качестве эффективного инструмента для автоматизации процедуры клиппирования при работе со спектрами виброскорости и виброускорения подшипников качения, где максимальные амплитуды значащих гармоник априори могут не принадлежать оборотной частоте. Единый диагностический критерий для выявления дефектов электрической природы разработан с учетом реализации многомерного пространства диагностических признаков при помощи алгоритмов скаляризации [8], включающих пошаговую сегментацию групп объектов с различной степенью

развития дефектов.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что предложенный методологический подход к разработке единых диагностических критериев и моделированию деградационных процессов изменения технического состояния может быть использован для внедрения элементов системы обслуживания техники по её фактическому состоянию и эффективного повышения безопасности при проведении открытых горных работ. Создаваемые единые диагностические критерии могут быть применены при реализации алгоритмов адап-

тивных моделей, позволяющих провести краткосрочное прогнозирование процессов деградации технического состояния сложных механических систем. Внедрение качественно более совершенной системы обслуживания горной техники станет залогом минимизации логистических издержек промышленных предприятий [16], уменьшения непроизводительных простоев горной техники и снижения числа несчастных случаев на производстве, связанных с недопустимым состоянием эксплуатируемых горных машин и комплексов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Герике П.Б., Нестерова О.А. Применение результатов неразрушающего контроля для создания методики распознавания технического состояния горно-шахтного оборудования по параметрам вибрации // Вестник КузГТУ. 2017. № 6. С. 162-169.
2. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. М.: Машиностроение, 1999. 344 с.
3. Неразрушающий контроль: Справочник: В 7 т. / Под общ. ред. В.В. Клюева. М.: Машиностроение, 2005. Т. 7: В 2 кн. 829 с.: ил.
4. V. Pozhidaeva. Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. World Tribology Congress III, September 12-16, 2005, Washington, D.C., USA
5. Tse P., Peng Y., Yam R. Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. Journal of Vibration and Acoustics. 2001. Vol. 123. Pp 303-310. DOI: 10.1115/1.1379745.
6. Краковский, Ю. М. Математические и программные средства оценки технического состояния оборудования. / Новосибирск: Наука, 2006. 227 с.
7. Барков А.В., Баркова Н.А. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие. С-Пб.: Изд-во СПбГМУ, 2004. 156 с.
8. Сушко А. Е. Разработка специального математического и программного обеспечения для автоматизированной диагностики сложных систем. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МИФИ. 2007. 170 с.
9. Bently D.E., Hatch C.T. "Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics", Bently Pressurized Press, 2002, P.726.
10. F. Balducchi, M. Arghir, S. Gaudillere. Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany.
11. Skeinik R., Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. CSI, Knoxville, TN 37923, USA.
12. Liu G., Parker R. Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. Journal of Mechanical Design. 2008. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13. DOI: 10.1115/1.2976803
13. Герике П.Б. Особенности комплексной диагностики энерго-механического оборудования экскаваторов типа ЭКГ по параметрам вибрации // Вестник КузГТУ. 2016. № 3. С. 63-72.
14. Ещеркин П.В. Разработка методики диагностирования и прогнозирования технического состояния дизель-гидравлических буровых станков. Автореф. дисс. .... канд. техн. наук. Кемерово, 2012. 18 с.
15. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. Иркутск: Издательство ИрГТУ, 1999. 230 с.
16. Клишин В.И., Зворыгин Л.В., Лебедев А.В., Савченко А.В. Проблемы безопасности и новые технологии подземной разработки угольных месторождений. Новосибирск, 2011. 524 с.

### REFERENCES

1. Gerike, P.B., & Nesterova, O.A. (2017). Primenenie rezultatov nerazrushaiushchego kontroliia dlia sozdaniia metodiki raspoznavaniia tekhnicheskogo sostoiianiia gorno-shahtnogo oborudovaniia po parametram vibratsii [Non-destructive testing results' application to create the mining equipment technical condition recognizing technique from vibration parameters]. *Vestnik KuzGTU – KuzGTU Herald*, 6, 162-169 [in Russian].
2. Goldin, A.S. (1999). *Vibratsiia rotornykh mashin [Vibration of rotary machines]*. Moscow: Mashinostroiieniie [in Russian].
3. Kluiev, V.V. (2005). *Nerazrushaiushchii kontrol [Non-destructive control]*. Moscow [in Russian].
4. Pozhidaeva, V. (2005). Determining the roughness of contact surfaces of the rolling bearings by the method of shock pulses. *World Tribology Congress III, September 12-16, Washington, D.C., USA* [in English].
5. Tse P., Peng Y., & Yam, R. (2001). Wavelet Analysis and Envelope Detection For Rolling Element Bearing Fault Diagnosis—Their Effectiveness and Flexibilities. *Journal of Vibration and Acoustics*. Vol. 123. Pp 303-310 [in English].
6. Krakovskii, Yu.M. (2006). *Matematicheskie i programmyie sredstva otsenki tekhnicheskogo sostoiianiia oborudovaniia [Mathematical and software tools for the equipment technical condition assessing]*. Novosibirsk: Nauka [in Russian].
7. Barkov, A.V. (2004). *Vibratsionnaia diagnostika mashin i oborudovaniia. Analiz vibratsii. Uchebnoie posobiie [Vibration diagnosis of machinery and equipment. Analysis of vibration. Tutorial]*. Sankt-Peterburg: SPbGMTU Publishing house [in Russian].
8. Sushko, A.Ye. (2007). *Razrabotka spetsialnogo matematicheskogo i programmnoo obespecheniia dlia*

- avtomatizirovannoi diagnostiki slozhnykh system [Development of special mathematical support and software for automated diagnostics of complex systems]. *Candidate's thesis*. Moscow [in Russian].
9. Bently D.E., Hatch C.T. (2002). *Fundamentals of rotating Machinery Diagnostics*, Bently Pressurized Press. [in English].
  10. Balducci, F., Arghir, M., & Gaudillere, S. (2014). Experimental analysis of the unbalance response of rigid rotors supported on aerodynamic foil bearings. *Proceedings of ASME Turbo Expo 2014: Turbine Technical Conference and Exposition GT2014*. June 16 – 20, 2014, Düsseldorf, Germany [in English].
  11. Skeinik R., & Petersen D. Automated fault detection via selective frequency band alarming in PC-based predictive maintenance systems. *CSI, Knoxville, TN 37923, USA* [in English].
  12. Liu G., & Parker R. (2008). Dynamic Modeling and Analysis of Tooth Profile Modification for Multimesh Gear Vibration. *Journal of Mechanical Design*. Vol. 130. Pp 121402/1 - 121402-13 [in English].
  13. Gerike, P.B. (2016). Osobennosti kompleksnoi diagnostiki ehnergo-mekhanicheskogo oborudovaniya ekskavatorov tipa EKG po parametram vibratsii [Features of EKG excavators power-mechanical equipment complex diagnostics by vibration parameters]. *Vestnik KuzGTU – KuzGTU Herald*, 3, 63-72 [in Russian].
  14. Yeshcherkin, P.V. (2012). Razrabotka metodiki diagnostirovaniia i prognozirovaniia tekhnicheskogo sostoyaniia dizel-gidravlicheskiykh burovnykh stankov [Diesel-hydraulic drilling rigs technical condition diagnosing and forecasting methods development]. *Extended abstract of candidate's thesis*. Kemerovo [in Russian].
  15. Lukianov, A.V. (1999). *Klassifikator vibrodiagnosticheskikh priznakov defektov rotornykh mashin [Classifier of rotor machines vibrodiagnostic defect signs]*. Irkutsk: IrGTU Publishong House [in Russian].
  16. Klishin, V.I., Zvorygin, L.V., Lebedev, a.V. & Savchenko, A.V. (2011). *Problemy bezopasnosti i novyye tekhnologii podzemnoi razrabotki ugolnykh mestorozhdenii [Coal deposits' underground mining safety problems and new technologies]*. Novosibirsk [in Russian].

### Главные цели «НЦ ПБ»:

Создать замкнутый цикл в решении проблем промышленной безопасности и охраны труда, обеспечив комплексный подход: от идеи до разработки нормативно - правовой базы и научно-производственных проектов с их полной последующей реализацией.

Оперативно и качественно решать вопросы с учетом индивидуальных особенностей и специфики шахт, разрезов и иных опасных производственных объектов.

### НАО «НЦ ПБ»

650002, г Кемерово, Сосновый бульвар, 1.

#### Генеральный директор

Ахлестин Николай Николаевич

Моб. 8-961-708-74-50

Тел./факс: (3842) 77-86-63

e-mail: a9617087450@gmail.com

#### Директор по проектированию

Артюшин Игорь Александрович

Тел. (384-2) 77-86-57

Моб. 8-923-611-27-41

e-mail: igor.artushin@gmail.com

## Непубличное акционерное общество «Научный центр промышленной безопасности»

государственно-частное партнерство

### Акционеры «НЦ ПБ»



ФГБОУ ВПО «КузГТУ»



АО НИИГД



ООО «ВостЭКО»

научный центр, основанный на государственно-частном партнерстве, сферой деятельности которого является обеспечение комплексного решения вопросов в области промышленной безопасности и охраны труда в горной и других отраслях промышленности.



### Стратегические направления деятельности:

- 1) Научно-исследовательская деятельность в области горных работ
- 2) Опытно-конструкторская деятельность
- 3) Производство инновационных научных разработок, применяемых на опасных производственных объектах
- 4) Испытательные лаборатории, сертификационные услуги.
- 5) Проектные работы, выполнения всего комплекса проектных работ для опасных производственных объектов. Свидетельство на виды работ № 2310 от 15 июля 2016, выданное Ассоциацией «Национальный альянс проектировщиков «ГлавПроект» № СРО-П-174-01102012
- 6) Развитие образовательной деятельности Научного центра, ориентированной на подготовку и переподготовку специалистов высшей квалификации в области промышленной безопасности.

на правах рекламы

## IV. ПРОБЛЕМЫ И СУЖДЕНИЯ

## IV. PROBLEMS AND OPINIONS



■ **Е. Н. Карнадуд //**  
**Ye. N. Karnadud**  
**Karnaduden@gmail.com**

канд. техн. наук, главный специалист электротехнического отдела ООО «Сибирский научно-исследовательский институт углеобогащения», Россия, 650000, г. Кемерово, ул. Карболитовская, 1/173

candidate of technical sciences, chief specialist of electrotechnical department, ООО "Siberian scientific-research institute of coal preparation", 1/173, Karbolitovskaia Street, Kemerovo, 650000, Russia



■ **А.А. Ярошик // А. А. Yaroshik**  
**gerrard\_30@mail.ru**

студент 4 курса механического факультета ФГБОУ ВО «КемГУ», Россия, 650024, г. Кемерово, ул. Ю. Двужильного 32 «Б».

4th year student of the Mechanics Faculty, FGBOU VO "KemGU", 32 "B", Yu. Dvuzhilnogo Street, Kemerovo, 650024, Russia

УДК 331.45:65.01

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В ОБЛАСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПЕРСОНАЛА НА ПРЕДПРИЯТИЯХ УГОЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

### MODERN TRENDS IN PRODUCTION PERSONNEL SAFETY PROVISION AT COAL INDUSTRY ENTERPRISES

*Несмотря на положительную тенденцию в области обеспечения безопасности обслуживающего персонала при добыче и переработке твердых полезных ископаемых, угольные компании инвестируют большие денежные средства с целью минимизации травм и гибели своих сотрудников, а также сотрудников подрядных организаций, осуществляющих свою деятельность на территории обогатительных фабрик, разрезов и шахт.*

*Одним из основных факторов, приводящих к возникновению опасных ситуаций на любом предприятии, является наличие в ограниченном пространстве большого количества подвижных частей механизмов (лент конвейеров, вибрационных сит грохотов и др.), а также необходимость выполнения трудовых обязанностей вблизи технологического оборудования.*

*Самым простым и эффективным средством защиты обслуживающего персонала от подвижных частей агрегатов является наличие ограждений вокруг опасных механизмов. Целостность ограждений контролируется датчиками. Однако датчики часто выходят из строя из-за механических повреждений, импульсных перенапряжений в цепи питания, а также тяжелых условий эксплуатации. В связи с производственной необходимостью обслуживающий персонал может снимать защитные ограждения. Таким образом, возникает ситуация, когда при отсутствии автоматической блокировки запуска механизма обслуживающий персонал выполняет свои трудовые обязанности в непосредственной близости от подвижных частей технологического оборудования, что в конечном итоге может повлечь за собой травмы и даже гибель людей.*

*Для предотвращения нештатного пуска технологического оборудования предлагается разработать автоматическую систему видеонаблюдения с применением методов компьютерного зрения. Подобные системы в режиме реального времени получают изображение с производственной площадки и посредством обработки полученной информацией с применением алгоритма компьютерного зрения, использующего локальные бинарные шаблоны, определяют наличие обслуживающего персонала на производственной площадке. При идентификации человека на полученном с видеокamеры изображении система формирует сигнал о запрете запуска (остановке) технологического оборудования.*

*Despite the positive trend in safety provision of service personnel in solid minerals mining and preparation coal companies continue to invest large amounts of money in order to minimize injuries and death cases among their employees, as well as employees of contractors operating at preparation plants, open-cast and underground mines.*

*One of the main factors leading to the dangerous situations' emergence at any enterprise is a large number of*



*moving parts of mechanisms (conveyor belts, vibration screens, etc.), presence in a restricted space as well as the need to perform labor duties near technological equipment.*

*The simplest and most effective means of protecting maintenance personnel from moving aggregate parts is the presence of fences around dangerous mechanisms. The integrity of fences is controlled by sensors. However, the sensors often fail because of mechanical damages, impulse overvoltages in the power circuit, and hard operating conditions. At the same time, because of production need, maintenance personnel can remove protective barriers. Thus, it is not uncommon for a situation where, on the one hand, there is no mechanism start automatic blocking, on the other hand, the service personnel carry out their labor duties in close proximity of technological equipment moving parts, which in the end can lead to injuries and even death of people.*

*To prevent non-standard start-up of technological equipment, it is proposed to develop an automatic video surveillance system using computer vision techniques. Such systems in real time receive an image from the production site and by processing the information obtained using a computer vision algorithm that uses local binary patterns, detect the maintenance personnel presence at the production site. When identifying a person on the image received from the camcorder, the system generates a signal about the prohibition of starting (stopping) technological equipment.*

**Ключевые слова:** КОМПЬЮТЕРНОЕ ЗРЕНИЕ, БЕЗОПАСНОСТЬ, ГОРНЫЕ РАБОТЫ, УГЛЕОБОГАЩЕНИЕ, ЛОКАЛЬНЫЕ БИНАРНЫЕ ШАБЛОНЫ, ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЕ

**Key words:** COMPUTER VISION, SAFETY, MINING WORKS, COAL PREPARATION, LOCAL BINARY PATTERNS, VIDEO SURVEILLANCE

## **Цель исследования.**

Данная статья посвящена рассмотрению вопросов снижения травматичности для обслуживающего персонала подвижными частями механизмов и агрегатов при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых путем использования автоматизированных интеллектуальных систем видеонаблюдения.

**Актуальность.** На сегодняшний день обеспечение безопасности труда на угледобывающих и углеперерабатывающих предприятиях Кузбасса является одной из важнейших задач. Так, в 2016 году угольные предприятия на нужды промышленной безопасности потратили 4,3 миллиарда рублей, при этом решался следующий круг задач:

- подготовка спасательных команд и групп быстрого реагирования;
- обеспечение персонала средствами индивидуальной защиты;
- повышение санитарно-технических условий труда;
- проведение анализа состояния системы охраны труда и промышленной безопасности
- закупка оборудования и приборов контроля.

Размер инвестиций в 2017 г на вышеперечисленные нужды сопоставим с 2016 г и на конец августа составил 2 миллиарда рублей [1].

Задача безопасной добычи угля настолько важна, что один из ведущих мировых произ-

водителей и экспортеров угля – СУЭК – отразил ее в своих стратегических приоритетах развития [2].

**Существующие методы решения поставленной задачи.** На сегодняшний день на территории Российской Федерации действуют ряд нормативных документов, регламентирующих порядок и правила проведения безопасных горных работ, в том числе:

Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых»;

ПБ 05-580-03 «Правила безопасности на предприятиях по обогащению и брикетированию углей (сланцев)».

Согласно нормативно-технической документации основными средствами предотвращения травмирования обслуживающего персонала вращающимися частями технологического оборудования являются:

- защитные ограждения, которые исключают доступ обслуживающего персонала к вращающимся и подвижным частям технологического оборудования;
- датчики ограждения (рис. 1а), контролирующие снятие (нарушение) ограждения;
- кабель-троссовые выключатели (рис. 1б), которые позволяют аварийно останавливать привод конвейера с любого места по всей длине механизма;
- аварийные грибовидные кнопки с фик-

сацией (рис. 1б), осуществляющие местную блокировку, предназначенную для предотвращения пуска механизма с дистанционного поста управления (АРМ оператора);

- звуковые, а в отдельных случаях и светозвуковые сигнализаторы, предназначенные для предупредительной сигнализации о начале запуска технологического оборудования.

Защитные ограждения, средства блокировки запуска аппаратов и механизмов, а также предупредительная сигнализация в нормальных режимах работы технологического оборудования обеспечивают безопасную работу при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых. Однако в процессе эксплуатации технологического оборудования угольная пыль, некорректные действия обслуживающего персонала, а также жесткие погодные условия приводят к выходу из строя средств противоаварийной автоматики, вследствие чего последние исключаются из схемы управления и блокировки, что является грубейшим нарушением правил безопасности и может привести к травмам и гибели людей. Кроме того, при уборке просыпей из-под лент конвейеров, очистке сит грохотов и кольцевых желобов сгустителей, проведении обслуживания и ремонтно-наладочных работ технологического оборудования возникает вероятность нештатного запуска привода механизма, что также может повлечь за собой несчастный случай.

Таким образом, по мнению авторов, существует необходимость в расширении номенклатуры приборов автоматизации для минимизации количества несчастных случаев вследствие деактивации средств противоаварийной блокировки, а также нештатных пусков технологического оборудования.

**Постановка задачи.** Авторы статьи предлагают развернуть на особо опасных технологических механизмах (дробилках, конвейерах, грохотах и др.) автоматизированную систему видеонаблюдения с применением методов компьютерного зрения. Данная система представляет собой совокупность средств фиксации видеоизображения, технического обеспечения,

а также информационного обеспечения, осуществляющего математическую обработку полученной информации с применением методов компьютерного зрения, в частности локальных бинарных шаблонов (local binary patterns).

**Обзор литературы.** Локальные бинарные шаблоны (ЛБШ) – это оператор (дескриптор), описывающий окрестность пикселя изображения в двоичной форме. ЛБШ является методом компьютерного зрения и используется главным образом для текстурного анализа изображений, однако существует ряд исследований, посвященных задаче идентификации человеческого лица с использованием данного дескриптора [3-6].

Локальные бинарные шаблоны предназначены для работы с монохромными изображениями. Монохромное изображение – это функция двух переменных  $f(x, y)$ , значение которой в координатах  $(x, y)$  является положительной скалярной величиной. Компьютерное зрение предназначено для работы с цифровыми изображениями, которые получаются в результате проведения процедур дискретизации и квантования. В результате операций дискретизации и квантования изображение представляет собой матрицу размерностью  $M \times N$ , каждый отдельный элемент данной матрицы (пиксель) характеризуется яркостью (интенсивностью), которая может принимать значения  $[0, L-1]$ . Максимальное значение  $L$  определяется выражением:

$$L = 2^k, \quad (1)$$

где  $k$  – количество бит, используемых для хранения яркости одного пикселя. Таким образом, яркость пикселя 8-ми битового монохромного изображения может принимать значения  $[0, 255]$ .

В простейшем случае оператор ЛБШ применяется к области изображения  $3 \times 3$  пикселя [7] с центральным пикселем  $n_c(x, y)$ . Центральный пиксель окружен двумя горизонтальными и двумя вертикальными соседними пикселями  $n_i$ , чьи координаты определяются выражением:

$$(x + 1, y), (x - 1, y), (x, y + 1), (x, y - 1), \quad (2)$$

а также четырьмя диагональными пикселями с координатами:

$$(x + 1, y + 1), (x + 1, y - 1), (x - 1, y + 1), (x - 1, y - 1). \quad (3)$$

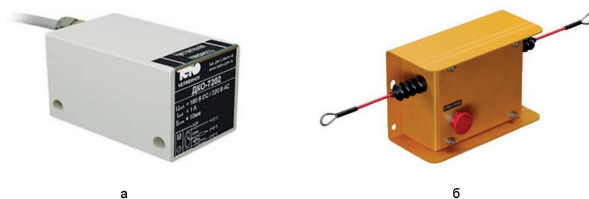


Рисунок 1 – Датчик контроля ограждения (а), кабель-тросовый выключатель (б)  
Figure 1 – Fence monitoring sensor (a), cable-rope switch (b)

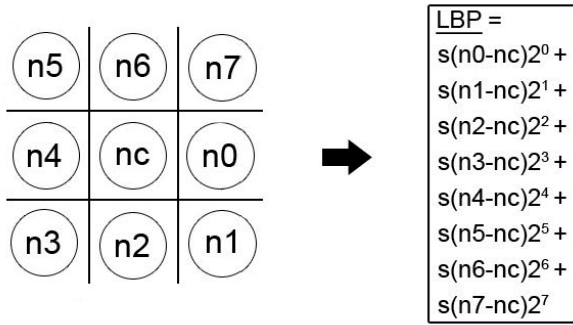


Рисунок 2 - Вычисление дескриптора ЛБШ  
Figure 2 - Calculating the Descriptor of Local Binary Templates

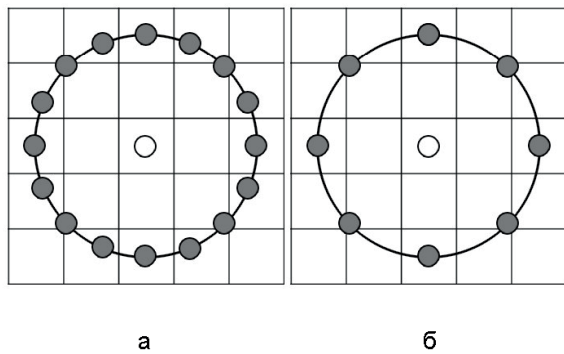


Рисунок 4 - Пример расширенного LBPP,R дескриптора:  
б - LBP 16,2; в - LBP 8,2  
Figure 4 - Example of an extended LBPP, R descriptor:  
b - LBP 16.2; in - LBP 8,2

Вычисление дескриптора ЛБШ включает в себя несколько этапов (рис. 2):

- формирование промежуточной матрицы, каждый элемент которой принимает значение 1, если  $n_i - n_c \geq l$  или 0 в противоположном случае;
- вычисление локального бинарного шаблона и перевод полученного значения в десятичную систему исчисления.

Вышеописанная последовательность действий может быть отражена в математическом выражении:

$$LBP(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} s(n_i - n_c) \cdot 2^i, \quad (4)$$

$$s(x) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \quad (5)$$

На рисунке 3 представлен пример расчета ЛБШ для фрагмента изображения 3x3 пикселя. На первом этапе осуществляется преобразование (thresholding) исходной матрицы согласно выражению (5).

ЛБШ для указанного фрагмента:

$$LBP(x, y) = \sum_{i=0}^{N-1} s(n_i - n_c) \cdot 2^i = 0 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^1 + 1 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^3 + 1 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^7 = 242$$

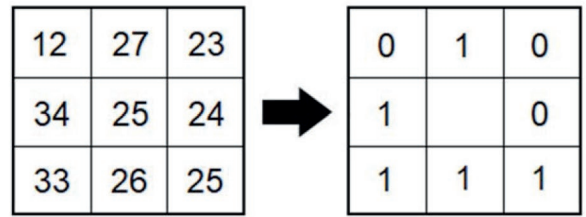


Рисунок 3 - Пример расчета ЛБШ для фрагмента изображения 3x3 пикселя  
Figure 3 - Example of LBT calculation for 3x3 pixel image fragment

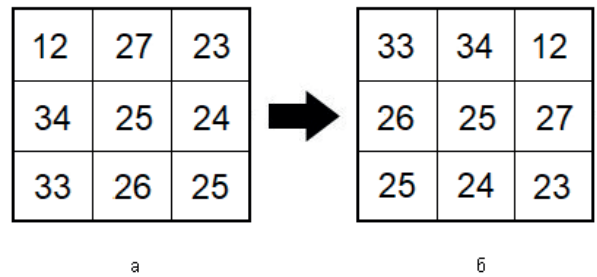


Рисунок 5 - Матрицы а и б идентичные друг другу, однако б получено путем вращения а на угол 45°  
Figure 5 - The matrices а and б are identical to each other, but б was obtained by rotating а through an angle of 45°

Позже дескриптор ЛБШ был расширен [8] и более не накладывал ограничений на размер окрестности вокруг центрального пикселя (окружность радиусом R), а также на количество пикселей P, принадлежащих данной окрестности (рис. 4).

Математическое выражение для нахождения расширенного ЛБШ:

$$LBP_{P,R}(x, y) = \sum_{p=0}^{P-1} s(n_p - n_c) \cdot 2^p \quad (6)$$

Исходя из выражения (6) можно сделать вывод о том, что оператор ЛБШ является инвариантным к монотонным изменениям монохромных изображений. На практике это означает, что качество работы алгоритма, использующего дескриптор ЛБШ, не будет зависеть от изменений условий освещенности на производственной площадке.

Также существует еще одна вариация оригинального ЛБШ, так называемый единообразный шаблон (uniform patterns)  $LBP_{P,R}^{U2}$ . Локальный бинарный шаблон считается единообразным, если количество побитовых переходов от 0 к 1 или наоборот не превышает 2. Например, 00000001 (1 переход), 01000000 (2 перехода) – единообразные шаблоны, в то

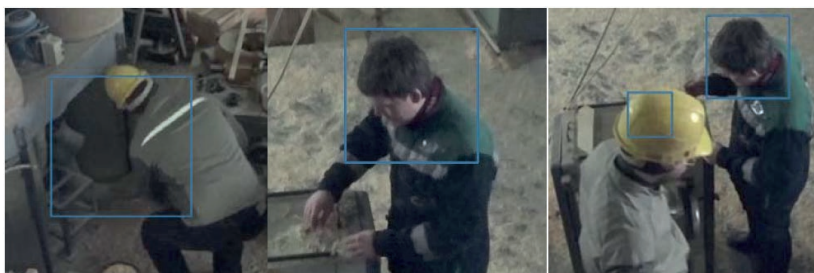


Рисунок 6 – Пример обработки изображения, полученного в реальных производственных условиях дескриптором ЛБШ  
 Figure 6 – An example of processing an image obtained in real production conditions with a LBS descriptor

время как 01000001 (4 перехода) и 01011101 (6 переходов) таковыми не являются. Авторы данного подхода обратили внимание на то, что в большинстве ЛБШ количество побитовых переходов не превышает 2. Напомним, что двоичный код расширенного ЛБШ определяется по окружности (см. рис. 4). Это значит, что первый и последний биты объединены.

Использование единообразных шаблонов привело к тому, что сократилось количество значений, которые могут принимать ЛБШ (меток ЛБШ). Для расширенного ЛБШ это значение определяется как  $LBP_{P,R}^U = 2^P$ , а для единообразного ЛБШ определяется выражением:

$$LBP_{P,R}^U = P \cdot (P - 1) + 3 \quad (7)$$

Например, количество меток для расширенного ЛБШ для окрестности радиусом  $R=1$  и количеством пикселей  $P=8$  составляет 256, а для единообразного шаблона 59.

Исследования показали, что использование единообразных шаблонов привело к увеличению стабильности работы алгоритма распознавания изображения.

В задаче идентификации обслуживающего персонала промышленных установок остро стоит вопрос надежности используемого дескриптора с учетом всех возможных положений человеческого тела в пространстве. Рассмотрим пример: изображения, матрицы которых представлены на рисунке 5, идентичны друг другу, однако второе изображение (рис. 5б) получено путем вращения первого изображения (рис. 5а) на угол  $45^\circ$ .

Произведем перерасчет ЛБШ:

$$\begin{aligned} LBP(x,y) &= \sum_{i=0}^{N-1} s(n_i - n_c) \cdot 2^i = 1 \cdot 2^0 + 1 \cdot 2^1 + \\ &+ 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^4 + 0 \cdot 2^5 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^7 : \\ &= 203 \end{aligned}$$

Сравнив значения ЛБШ для указанного примера ( $242 \neq 203$ ), можно сделать заключение,

что базовый и единообразный ЛБШ не предназначены для работы с реальными изображениями. Для преодоления данного недостатка применяется так называемый повернутый локальный бинарный шаблон (rotated local binary pattern) [9]. Повернутый локальный бинарный шаблон (ПЛБШ) характеризуется введением понятия «доминирующее направление» (dominant direction). Доминирующее направление определяется максимальной разностью центрального и соседствующего пикселей:

$$D = \arg \max_{p \in \{0,1,\dots,P-1\}} |n_p - n_c| \quad (8)$$

В исходном изображении доминирующее направление определяется пикселем с интенсивностью 34 (соответствующий индекс D выделен жирным) 01001111, в повернутом изображении доминирующее направление также определено пикселем с интенсивностью 34, однако оно смещено на 2 шага 11010011. Таким образом, зная смещение доминирующего направления D, можно определить ПЛБШ из уравнения:

$$RLBP_{R,P} = \sum_{p=0}^{P-1} s(n_p - n_c) \cdot 2^{mod(p-D,P)} \quad (9)$$

**Заключение.** Локальные бинарные шаблоны главным образом предназначены для проведения текстурного анализа изображений, однако они обладают рядом положительных свойств, таких как инвариантность к равномерному изменению освещенности и вращению искомого объекта (ПЛБШ). Кроме того, вычисление ЛБШ не требует привлечения больших вычислительных ресурсов. Проанализировав работу предварительно обученного алгоритма компьютерного зрения, использующего локальные бинарные шаблоны (см. рис. 6), можно сделать вывод о том, что данный подход может быть применен для построения автоматизированной системы видеонаблюдения, функционирующей в режиме реального времени.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Главные задачи Кузбасса: вопросы безопасности и развитие углехимии // МИА «Россия сегодня». [Электрон-

ный ресурс]. Режим доступа: <https://ria.ru/economy/20170827/1501163353.html>

2. Наш подход – Устойчивое развитие СУЭК // Официальный сайт СУЭК. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.suek.ru/sustainability/our-approach>
3. Ahonen T., Hadid A., Pietikäinen M. Face Recognition with Local Binary Patterns. In: Pajdla T., Matas J. (eds) Computer Vision - ECCV 2004. ECCV 2004. Lecture Notes in Computer Science, vol 3021. Springer, Berlin, Heidelberg.
4. D. Huang, C. Shan, M. Ardebilian, Y. Wang, and L. Chen. Local Binary Patterns and Its Application to Facial Image Analysis: A Survey. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011, 4, 41, pp.1-17. □10.1109/TSMCC.2011.2118750□
5. G. Heusch, Y. Rodriguez and S. Marcel. «Local Binary Patterns as an Image Preprocessing for Face Authentication». FGR '06 Proceedings of the 7th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, pp 9-14.
6. I. Chingovska, A. Anjos, and S. Marcel. «On the effectiveness of local binary patterns in face anti-spoofing». In IEEE International Conference of the Biometrics Special Interest Group, 2012.
7. T. Ojala, M. Pietikäinen, and D. Harwood. «A comparative study of texture measures with classification based on featured distribution,» Pattern Recognition, vol. 29, no.1, pp. 51–59, 1996.
8. Ojala, T., Pietikäinen, M., Mäenpää, T.: Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 24(7), 971–987 (2002)
9. R. Mehta, K. Egiazarian. Rotated Local Binary Pattern (RLBP): Rotation invariant texture descriptor. Pattern Recognition Letters, vol. 71 Issue C, pp. 16-22, February 2016 .

## REFERENCES

1. Glavnyie zadachi Kuzbassa: voprosy bezopasnosti i razvitie uglekhimii [Kuzbass main tasks: the coal chemistry safety and development issues]. MIA "Rossia segodnia MIA Russia today. Retrieved from: <https://ria.ru/economy/20170827/1501163353.html> [in Russian].
2. Nash podkhod – Ustoichivoie razvitie SUEK [Our approach – Stable SUEK development]. Retrieved from: <http://www.suek.ru/sustainability/our-approach/> [in Russian].
3. Ahonen T., Hadid A., Pietikäinen M. Face (2004) Recognition with Local Binary Patterns. In: Pajdla T., Matas J. (eds) Computer Vision - ECCV 2004. Lecture Notes in Computer Science, vol 3021. Springer, Berlin, Heidelberg [in English].
4. D. Huang, C. Shan, M. Ardebilian, Y. Wang, and L. Chen. (2011). Local Binary Patterns and Its Application to Facial Image Analysis: A Survey. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, Institute of Electrical and Electronics Engineers, 4, 41, pp.1-17 [in English].
5. G. Heusch, Y. Rodriguez and S. Marcel. Local Binary Patterns as an Image Preprocessing for Face Authentication. FGR '06 Proceedings of the 7th International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, pp 9-14 [in English].
6. I. Chingovska, A. Anjos, and S. Marcel. (2012). On the effectiveness of local binary patterns in face anti-spoofing. In IEEE International Conference of the Biometrics Special Interest Group [in English].
7. T. Ojala, M. Pietikäinen, and D. Harwood. (1996). A comparative study of texture measures with classification based on featured distribution, Pattern Recognition, vol. 29, no.1, pp. 51–59, [in English].
8. Ojala, T., Pietikäinen, M., Mäenpää, T. (2002). Multiresolution gray-scale and rotation invariant texture classification with local binary patterns. IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 24(7), 971–987 [in English].
9. R. Mehta, K. Egiazarian. (2016). Rotated Local Binary Pattern (RLBP): Rotation invariant texture descriptor. Pattern Recognition Letters, vol. 71 Issue C, pp. 16-22, [in English].



# GaSos

## Стационарный газоанализатор контроля параметров атмосферы в зоне отработанного пространства

**Блок индикации и передачи данных**

**Индикация**  
Цветной графический экран позволяет отображать данные в режиме «онлайн» для всех измеренных параметров одновременно. Возможен вывод любой статистики в виде графиков или диаграмм.

**Управление**  
Антивандажные кнопки

**Выносной блок для измерения концентрации газов и контроля параметров атмосферы**

Измерение до 6 газов одновременно, а также температуры, относительной влажности и абсолютного давления одним блоком диффузионным методом без пробоотборного насоса. Данная методика измерения позволяет снизить энергопотребление и повысить надежность газоанализатора

**Зона отработанного пространства**



**Передача данных**  
Передача измеренных и расчетных данных в систему сбора информации шахты по цифровому интерфейсу RS-485 и по аналоговому выходу 0,4-2В

на правах рекламы

indsafe.ru



С. В. Бычков // S.V. Bychkov  
serguei58@rambler.ru

горный инженер, Канада, Ванкувер  
mining engineer, Vancouver, Canada

УДК 550.34, 551.2, 537.86

## ГОРНЫЙ МАССИВ КАК АККУМУЛЯТОР ЭНЕРГИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ, ГОРНЫХ УДАРОВ И ВНЕЗАПНЫХ ВЫБРОСОВ. МИФ ИЛИ РЕАЛЬНОСТЬ? ROCK MASSIVE AS THE EARTHQUAKE, ROCK SHOCKS AND SUDDEN OUTBURSTS ENERGY ACCUMULATOR. MYTH OR REALITY?

В настоящий момент в геофизике сложилась парадоксальная ситуация: наука сейсмология, как часть геофизики, существует, а реальные результаты исследований отсутствуют. Это происходит потому, что гипотеза Рейда-Рихтера [H.Reid, C.Richter], ставшая догматическим фундаментом сейсмологии, является лженаучной, ибо нарушает фундаментальные законы физики. Следовательно, не имея реальной теории подвижек земной коры, все исследования упрутся, и будут упираться в тупик, пока сейсмология не обретёт почву в виде теории, опирающейся на научную основу. Вся беда заключается в том, что Рейд и Рихтер не понимали смысл второго закона термодинамики и принципа минимума энергии, вытекающего из этого закона, применительно к процессу землетрясений, а последовавшие за ними исследователи в силу академической инерции мышления возвели их гипотезу в ранг догмы. Цель данной статьи: донести до исследователей ложность гипотезы корифеев сейсмологии Рейда и Рихтера и наметить альтернативный путь объяснения причин землетрясений, горных ударов и внезапных выбросов. В статье также высказаны критические замечания к работе академика РАН А.Л. Бучаченко «Магнитоупругость и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу»? На наш взгляд, именно данная работа является зеркалом современного и типичного отражения вопроса о причинах и энергии землетрясений. Вторая цель статьи: наметить альтернативный путь объяснения причин землетрясений, горных ударов и внезапных выбросов.

*At the moment, a paradoxical situation has arisen in geophysics: the science of seismology, as part of geophysics, exists, and the real results of research are absent. This is because the Reid-Richter hypothesis [H.Reid, C.Richter], which became the dogmatic foundation of seismology, is pseudoscientific, because it violates the fundamental laws of physics. Consequently, without having a real theory of the earth's crust movements, all the research will be rested and will rest on a dead end until seismology finds the ground in the form of a theory based on a scientific basis. The whole trouble is that Reid and Richter did not understand the meaning of the second law of thermodynamics and the principle of minimum energy resulting from this law with reference to the process of earthquakes, and the researchers who followed them, because of the academic inertia of thinking, raised their hypothesis to the rank of dogma. . The purpose of this article is to bring to the researchers the seismology coryphaeus Reid and Richter hypothesis falsity and to outline an alternative way of explaining the causes of earthquakes, rock shocks and sudden outbursts. In this article critical remarks to the work of Academician of the Russian Academy of Sciences A.L. Buchachenko «Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Is it possible to prevent a catastrophe?» are expressed. In our opinion, this particular work is a mirror of the modern and typical reflection of the earthquakes causes and energy question. The article second goal is to outline the earthquakes, rock shocks and sudden outbursts causes an alternative way of explaining.*

**Ключевые слова:** ДЕФОРМАЦИОННЫЙ ВЗРЫВ ГОРНЫХ ПОРОД, СЕЙСМОЛОГИЯ, ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЕ, ГОРНЫЙ УДАР, ВНЕЗАПНЫЙ ВЫБРОС, ЭНЕРГИЯ ДЕФОРМАЦИЙ, ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ, ПРИНЦИП МИНИМУМА ЭНЕРГИИ

**Key words:** MINE ROCK DEFORMATIONAL EXPLOSION, SEISMOLOGY, EARTHQUAKE, ROCK SHOCK, SUDDEN OUTBURST, DEFORMATION ENERGY, THE SECOND LAW OF THERMODYNAMICS, THE MINIMUM ENERGY PRINCIPLE.

**Теоретическая часть:**

Существующие в настоящее время теории происхождения землетрясений противоречивы и безнадежно устарели. Отсутствие даже микромизерных результатов в деле прогноза землетрясений однозначно указывают на полное и провальное несоответствие современных представлений о природе землетрясений. Все известные теории подвижек земной коры, пути и методы их исследования зашли в глухой тупик, а сейсмологическое поле исследований превратилось в огромный лабиринт, из которого, кажется, нет выхода. Какой бы путь учёные не выбрали, они вынуждены возвращаться на исходные позиции гипотезы Резиновой отдачи 1910 года. Именно в результате полного отсутствия прогресса в ходе исследований процесса землетрясений в научной среде сложилось устойчивое мнение о якобы невозможности прогноза и предупреждения землетрясений ввиду отсутствия какой-либо системы их проявления. Считается, что механизм землетрясений состоит из набора факторов и условий абсолютно случайного характера, ведущих к непредсказуемости этого события и нулевой вероятностью прогноза. Значительная часть существующих сегодня моделей очагов землетрясений, несмотря на время появления, разницу в формулировках и названиях, разработана на платформе научных разработок корифеев сейсмологии Г.Ф. Рейда и Ч.Ф. Рихтера. В рамках их концепций утверждается, что подземным толчкам предшествует появление препятствий смещению пород вдоль разлома горного массива, которое определяет постепенное повышение действующих упругих напряжений. В результате этого сброс внутренней механической энергии горным массивом резко замедляется, что приводит к накоплению энергии упругих деформаций с последующей их реализацией в виде толчков. Эта знаменитая гипотеза стала путеводной звездой и непреложным законом мировой сейсмологии и превратилась во вредную догму. К сожалению, все современные представления о процессе землетрясений [1], основанные на этой гипотезе, а также на её многочисленных теоретических клонах, не только не объясняют физической сути происходящих событий в гипоцентрах землетрясений, но, по сути, являются лженаучными, ибо противоречат фундаментальным законам физики. Мало того, учёными до сих пор не выяснена природа сейсмических ударов, ибо до сих пор нет ответа на вопрос о физическом смысле возникновения энергии в очаге землетрясений. Понятие энергии как основы материи, как основы всего, что

существует во Вселенной, довольно сложно. Поэтому совсем не удивительно, что некоторые исследователи демонстрировали и демонстрируют непонимание всех её видов, участвующих в таком сложном процессе, как землетрясение: от полей и волн до частиц, атомов, молекул как в контексте механизмов перехода ее из одних форм в другие, так и в контексте её выделения в гипоцентре землетрясения. Видимо, этим объясняется и из этого вытекает непонимание того, что энергия является формой движения и что запах, исходящий от ветки акации, также является движением, а мера этого движения - энергия запаха ветки акации в окружающем мире ничем не отличается от энергии землетрясения. Разве только удельным значением. Именно второй закон термодинамики, с его, казалось бы, простой формулировкой, определяющей его суть, изложенной Клаузиусом: «Само собой теплота передаётся лишь от тела с более высокой температурой к телу с меньшей температурой. В обратном направлении самопроизвольная передача теплоты невозможна» - спутал мысли не одного великого учёного как в прошлом, так и в настоящем временах. Это известно из истории физики, и перечислять их имена здесь не имеет смысла. Отсюда путанность понятий и нелепые ошибки некоторых исследователей в понимании и объяснении энергетики сейсмических процессов и самой сути землетрясений, горных ударов и внезапных выбросов. Суть проблемы ложного посыла догмы Рейда-Рихтера хорошо понятна из слов номинанта на Нобелевскую премию 2016 года, академика РАН, А.Л. Бучаченко [2]: - «Земная кора не является ни абсолютно упругим, ни абсолютно пластическим телом – и в ней запасается упругая энергия, в ней запаздывание между деформационной накачкой энергии и её катастрофическим высвобождением (землетрясением) достигает нескольких лет, а иногда столетий». Видимо, авторитет Рейда и Рихтера, авторитет сотен научных звёзд зарубежной и отечественной геофизики, присягнувших догме накопления горным массивом энергии деформаций как источнике землетрясений, не позволили автору прорваться сквозь барьер этого стереотипа. А попытка была. В своей работе автор все-таки попытался ответить на главный вопрос: может ли накапливать энергию упругое тело? И отвечает – нет, ибо вся упругая энергия будет тратиться на образование микротрещин и разрыв межмолекулярных и химических связей. При этом академик ссылается на разработанный в 1920 году механизм релаксации энергии в упругих телах господина Гриффитса и словно

забывает о существовании обыкновенных пружин. Мы понимаем стремление автора подвести нас к своему коньку – теме развития трещин в процессе магнитопластичности, но вынуждены возразить, ибо, по нашим представлениям, теория А. Гриффитса имеет ряд существенных недостатков применительно к горному массиву. Во-первых, его энергетическая концепция рассматривает разрушение твердого тела как атермический процесс, следовательно, она физически не может быть оправдана для работы механизма разрушения массива при вулканических, средне и глубокофокусных землетрясениях, когда массив находится под воздействием высокой температуры. Во-вторых, не учитывается зависимость прочности массива от временного фактора и, следовательно, от степени деградации массива, длящейся сотни лет. В-третьих, при расчёте критического напряжения из равенства изменения упругой энергии деформации массива и изменения его поверхностной энергии не учитываются механические потери на разрушение массива, что противоречит закону сохранения энергии. Следовательно, если мы и можем применить механизм А. Гриффитса применительно к горному массиву, то с большой осторожностью, не слишком доверяя полученным результатам.

Как бы там ни было, автор на первый вопрос ответил отрицательно, что полностью подтверждает нашу теорию. Второй вопрос автора статьи прозвучал так: может ли горный массив накапливать энергию деформаций, находясь в пластическом состоянии? И отвечает – ни в коем случае. Теперь, казалось бы, всё стало на свои места, и автору пора было бы констатировать революционный и единственно правильный вывод о том, что горный массив никаким образом не может накапливать энергию деформаций и что догма Рейда-Рихтера является ложной. Но именно в этот момент автор статьи делает довольно интересное заявление, которое мы привели выше и ввиду его важности приводим сейчас: “Земная кора не является ни абсолютно упругим, ни абсолютно пластическим телом – и в ней запасается упругая энергия, в ней запаздывание между деформационной накачкой энергии и её катастрофическим высвобождением (землетрясением) достигает нескольких лет, а иногда столетий”. Беззаветно веря в непогрешимость догмы Рейда-Рихтера, автор в последний момент не решился сделать столь радикальный вывод и мастерски обходит возникшее теоретическое препятствие, возведённое им самим, вводя понятие промежуточного состояния зем-

ной коры, которая в этом состоянии, как он полагает, имеет возможность аккумулировать энергию деформаций. Мы согласны, что одни и те же твёрдые тела одновременно могут быть упругими и пластическими. Это зависит от характера деформации, свойств тела, температуры. И это состояние тела легко и давно объяснено: в твердых телах при деформации частицы, которые находятся в узлах кристаллической решетки, смещаются из положений равновесия. Смещению мешают молекулярные силы, с которыми взаимодействуют частицы твердого тела между собой. Если деформация является упругой, то в кристаллах атомы смещаются незначительно. При пограничных величинах деформаций смещения атомов могут быть в несколько раз больше, чем расстояния между ними, но масштабного нарушения всей кристаллической структуры тела нет, и только отдельные слои кристаллической решетки проскальзывают относительно друг друга. Кроме того, смещение атомных слоев идет не одновременно по всему объему, а может начинаться только с некоторых краевых частей тела. Может ли массив находиться в таком пограничном состоянии? Может. К примеру, в течение короткого промежутка времени, когда в момент изменения силы горного давления будут закрываться или, наоборот, открываться микротрещины массива. Мы знаем, что тело может аккумулировать энергию, если меняет форму и размеры, что и произойдет, когда начнут смыкаться-размыкаться микротрещины. В этот момент массив будет представлять собой именно не упругое и не пластичное тело, а промежуточное, о котором ведёт речь автор статьи. Но, к великому сожалению автора этой гипотезы, никакой энергии аккумулировать массив не сможет, так как всю энергию деформаций он потратит на пластическое смыкание-размыкание трещин, а после этого массив опять превратится в упругое тело, не способное накапливать энергию. При всём уважении к приверженцам школы Рейда и Рихтера и к автору статьи хочется задать вопрос: как объяснить накопление энергии деформаций массивом при техногенных или обвальных землетрясениях, которые происходят буквально в течение нескольких секунд или минут после технического, технологического или природного события (например, после ядерного испытания) в абсолютно асейсмичных районах? Это невозможно, ибо по своей логической и идеализированной сути пребывания массива в состоянии покоя за тысячи и миллионы лет эти районы стали изолированными системами, которые (почти) не обмениваются с окружающей средой ни ве-



ществом, ни энергией. Согласно постулату второго закона термодинамики такая система со временем постепенно приходит в состояние термодинамического равновесия, где даже чисто теоретически ни о каком накоплении (!) упругой энергии деформаций не может быть и речи, ибо ей попросту неоткуда взяться. Последователям Рейда и Рихтера в начале объяснения процесса землетрясения было бы правильно предложить научному обществу хотя бы один из известных науке механических, физических или химических механизмов накопления энергии породами горного массива. К примеру, известно, что грозовая туча накапливает механическую энергию ветра в форме электрического заряда, а пружина накапливает энергию деформации в форме потенциальной энергии. Известно, что для аккумуляции энергии необходимо выполнить определённые условия, без которых процесс накопления энергии невозможен. Как видно в случае с пружиной, этим условием будет изменение её формы и размеров. А каковы условия накопления энергии для горного массива? И какова будет форма энергии? В какие ещё формы она будет трансформироваться? Странно, но почему-то никто за последние столетие не попытался и не пытается объяснить с точки зрения физической, химической или математической модели работу природного аккумулятора энергии землетрясений. Нам не только не разъясняют детальное устройство этого накопителя энергии, но даже не могут объяснить физический смысл и приблизительный принцип его магической работы. Чудо? Природный феномен? Нет ответа и на ещё один важный вопрос: что собой представляет явление или процесс, не позволяющий энергии деформаций рассеиваться в окружающем пространстве, хотя бы в виде элементарного теплового излучения? Почему энергия не расходуется до последнего Джоуля на естественные, нескончаемые процессы метаморфизма, горообразования и тектогенеза горных пород, которые требуют ежесекундного грандиозного расхода энергии? Этот же важный вопрос прозвучал и у автора выше отмеченной статьи: “Ключевой вопрос, в котором заключена интрига землетрясения, - почему при огромном изобилии механизмов и каналов релаксации энергии, вносимой деформацией (через генерацию дефектов и вакансий, дислокаций, микро- и макроскопических трещин и т.д.), все-таки деформационная накачка энергии превосходит утечку, сброс энергии”. К сожалению, ответа на этот вопрос в статье не последовало, а без ответа на этот вопрос, как вы понимаете, в сейсмологии

невозможно пройти даже шаг, ибо неизвестно куда идти. А ответ на этот архиважный вопрос очевиден и лежит на поверхности: никакого природного аккумулятора энергии землетрясений не существует и не может существовать!!! Аккумуляция энергии любой существующей в природе горной системой противоречит хорошо известному любому физическому и химическому постулату Принципа Минимума Энергии, который гласит, что любая система стремится к самому низкоэнергетическому из доступных системе состояний. Любое состояние горного массива с высокой энергетической накачкой крайне неустойчиво, и горный массив будет всеми путями стремиться к скорейшему сбросу энергии, что и происходит, в первую очередь, при тепловой конверсии, метаморфизме, горообразовании и тектогенезе горных пород. Именно принцип минимума энергии ограждает нас от каждодневных разрушительных землетрясений и породил на Земле горные системы. Если мы не будем тратить энергию на удержание пружины в сжатом положении, то она тут же сбросит запасённую энергию, а грозовая туча разрядится при первой же возможности, если не через заземление, то через рассеивание энергии между молекулами воздуха в атмосфере. Рассуждая об энергии землетрясений, последователи Рейда – Рихтера словно забыли (не знали?) о существовании второго закона термодинамики (1850 г.), из которого и вытекает принцип минимума энергии и механизм преобразования различных форм материи из одной в другую. Из него можно сделать вывод: избыточная энергия абсолютно любой системы “консервируется и конвертируется”, если так можно сказать, не в виде энергии упругих деформаций и мифической энергии резиновой отдачи Рейда, а в виде перехода одной формы энергии в другую. Это может вылиться в образование новых химических связей, изменение орбит электронов и структур в виде физических размеров и объёма, и, наконец, в напряжённость энергетического поля, с помощью которого происходит энергетический обмен и поддержание стабильности системы. Именно второй закон термодинамики постулирует невозможность передачи тепла от более холодной системы к более горячей. Проще говоря, не может физический булыжник, нагретый в костре, не передавать полученную энергию окружающей его природной среде и оставаться горячим много-много лет! Иначе нам пришлось бы признать атом вечным двигателем и погибнуть. Именно погибнуть, ибо, согласно теории Вероятностей, какой-нибудь один из сотен миллионов горных массивов (систем), текто-

нических плит, блоков, пластов за миллиарды лет, что существует Земля, Джоуль за Джоулем смог бы скопить и одновременно реализовать такое количество энергии, что её бы хватило, чтобы расколоть земной шар на несколько частей. Но этого ужасного и катастрофического события до сих пор не произошло и, к счастью для нас, никогда не произойдёт именно благодаря принципу минимума энергии системы, который вкупе с фундаментальным законом сохранения энергии определяют существование Вселенной. В этой связи буквально напрашивается хорошо известный и анекдотичный пример, который, к сожалению, анекдотом не является. Один “учёный” предложил первому президенту России Б.Н. Ельцину реализовать проект извлечения запасённой булыжником энергии, полученной им от деформаций, которым подвергся этот булыжник в далёком прошлом. Как вы знаете, этот “учёный” получил(!) на его реализацию 120 миллионов рублей из бюджета [3]. А что сделали учёные-рейдисты, прекрасно понимая, что если продолжать следовать в русле гипотезы накопления горным массивом энергии деформации, то в какой-то момент массив сможет накопить энергию, достаточную для разрушения Земли? Они “гениально” и в приказном порядке ограничили накопление энергетической насыщенности массива до предела землетрясения с магнитудой 9, а землетрясения свыше магнитуды 9 запретили [4]. Выходит, что в современной сейсмологии физические законы работают до установленного ими предела магнитуды 9, а после достижения этой “роковой девятки” законы работать отказываются. При этом исследователи ссылаются на особые физико-химические параметры горного массива и байки сейсмологов о невозможности растрескивания массива на глубине свыше 50 км. Приводятся и другие специфические данные глубинного строения земной коры, которые якобы не позволят массиву копить энергию деформаций свыше  $M_9$ , словно кто-то в настоящее время может с уверенностью сказать, какова реальная физическая и химическая структура горных пород на большой глубине и какие особые процессы, не подчиняющиеся физическим законам на поверхности Земли, там происходят. Именно поэтому, так и не решив проблему физического образования и накопления в массиве энергии землетрясений, её природу, форму и выделяемое количество в единицу времени, сейсмологи наизобретали большое количество методик расчёта магнитуды землетрясений [5], которые на самом деле не совсем согласуются с результатами наблюдений. Мало

этого, учёные в качестве доказательства аккумуляции горным массивом потенциальной энергии деформаций постарались привязать сюда известный эмпирический закон [6] Гуттенберга – Рихтера:

$$LgN = a - bM, \quad (1)$$

где  $a$  и  $b$  – эмпирические константы, которые описывают зависимость между магнитудой и общим числом землетрясений для любого заданного региона и промежутка времени. При этом исследователи привязывают константы повторяемости землетрясений к различным пространственным и временным вариациям, одной из которых является запасённая энергия напряжений горного массива, о величине и природе которой учёные-рейдисты только гадают. Странно, но некоторые исследователи не могут понять простого вывода, вытекающего из ими же приведённого закона повторяемости землетрясений: массив, разрушенный прежними землетрясениями, никаким образом не может накапливать энергию упругих деформаций в силу того, что этот массив подвергся пластическим деформациям, разрушен сетью трещин и разбит на многочисленные блоки разломами, сбросами и сдвигами. Это значит, что в районе произошедшего когда-то землетрясения, исходя из их гипотезы аккумуляции массивом энергии, повторные подземные толчки физически невозможны. Согласно второму закону термодинамики, чтобы разрушенный массив хотя бы начал воспринимать упругие нагрузки, не говоря уже об аккумуляции их энергии, его надо сначала “подлатать: склеить, заново родить, перекристаллизовать”, а, следовательно, затратить энергию и время. Но, к неподдельному удивлению последователей Рейда и Рихтера, землетрясения в одних и тех же районах повторяются и повторяются!? Вот и приходится исследователям этой школы, чтобы хоть как-то оправдать сей парадокс, выдумывать лазейки для “поддержания наплаву” гипотезы о накоплении горным массивом энергии и ограничить её предельной магнитудой 9. На самом деле, закон Гуттенберга-Рихтера и второй закон термодинамики позволяют сделать два простых, но очень важных для геофизики вывода. Первый: если массив подвергся подземным толчкам и разрушен на мелкие блоки, а землетрясения в этом районе продолжают, то это значит, что гипотезы землетрясений представляют собой реально небольшие элементарные объёмы породы, которые являются частью бывшего цельного массива. Маленькие каверны внезапных выбросов в шахтах от  $1 м^3$  до наибольшей известной каверны примерно  $2500 м^3$  ( $13 \times 13 \times 15 м$  образовав-

шейся после внезапного выброса при проходке тоннеля Арпа – Севан) подтверждают это заключение. То есть, если взять блок массива в виде куба с ребром всего 100 м и объёмом 1 000 000 м<sup>3</sup> и применить принцип подобия, то этого объёма хватит в 400 раз повысить силу Севанского выброса и получить “приличное” землетрясение. Второй вывод органически вытекает из первого: чем на большее количество блоков землетрясение разбило массив, тем чаще в этом районе будут происходить землетрясения. Чем больше блоков и чем меньше их размеры, тем больше неустойчивость массива, а каждый потерявший устойчивость блок способен генерировать свой собственный очаг землетрясения. Математические модели, описывающие соотношения между напряжениями и деформациями для различных горных пород, давно разработаны и подкреплены экспериментальными данными. Эти модели достаточно точно отражают реальные свойства различных материалов, которые мы можем применить к горным породам, и именно результаты математического моделирования показывают, что потенциальная энергия деформаций может накапливаться в горном массиве. Но здесь существует одно «но», которое перечёркивает все модели применительно к процессу землетрясений, а именно условие нагружения образца. Другими словами, если мы говорим о накоплении энергии горным массивом, то мы должны говорить об упругих деформациях с позиции модели упругости и пластичности. Математически же свойство упругости выражается в установлении взаимно однозначной функциональной зависимости между компонентами тензора напряжений и тензора деформаций и отражает не только свойства материалов, но обязательный параметр, без которого математическая модель не будет соответствовать действительности - условие восприятия нагрузок. Для большинства материалов свойство упругости проявляется при умеренных значениях внешних сил, приводящих к малым деформациям, при малых скоростях приложения нагрузок за большой промежуток времени, что почти идеально подходит для описания деформации горных пород массива. Всё, кроме одного: испытываемый образец находится в массиве и не обладает плоскостями свободы, чтобы как обыкновенная пружина, изменив под действием деформации объём и форму, сохранять полученную энергию. Следовательно, не изменив форму и размеры, нельзя накапливать энергию. Это легко доказывается. Чтобы определить потенциальную энергию, накапливаемую в процессе упругой деформации, рассмотрим

элементарный объём:

$$dV = d_x d_y d_z, \quad (2)$$

в условиях одноосного напряжения (растяжения-сжатия) образца рис.1. На образец действует сила  $\sigma_x d_y d_z$ . Эта сила совершает работу на перемещении  $\varepsilon_x d_x$ . При увеличении напряжения от нулевого уровня до значения  $\sigma_x$  соответствующая деформация в силу закона Гука также увеличивается от нуля до значения  $\varepsilon_x$ , а работа пропорционально будет равна:

$$dA = 0.5 \sigma_x \varepsilon_x dV \quad (3)$$

В силу закона сохранения энергии это и будет *потенциальная энергия*, накапливаемая в процессе деформаций элементарным объёмом горного массива:

$$dA = dU = 0.5 \sigma_x \varepsilon_x dV \quad (4)$$

Величина

$$\Phi = dU / dV \quad (5)$$

есть удельная потенциальная энергия деформации, имеющей физический смысл потенциальной энергии, накопленной в единице объёма тела.

В связи с тем, что элементарный объём  $dV = d_x d_y d_z$  находится в массиве и не имеет плоскостей свободы, то любое одноосное нагружение мы можем рассматривать как объёмное, которое, в свою очередь, можно разделить на два состояния, в одном из которых изменяется элементарный объём, а в другом – форма. В связи с этим выделяют потенциальную энергию изменения объёма и потенциальную энергию изменения формы. Так как наш элементарный объём находится в массиве, то никакого изменения объёма и изменения формы произойти не может, то есть  $\varepsilon_x = 0$ , следовательно

$$dA = dU = 0.5 \sigma_x \varepsilon_x dV = 0 \quad (6)$$

То есть, потенциальная энергия, накапливаемая

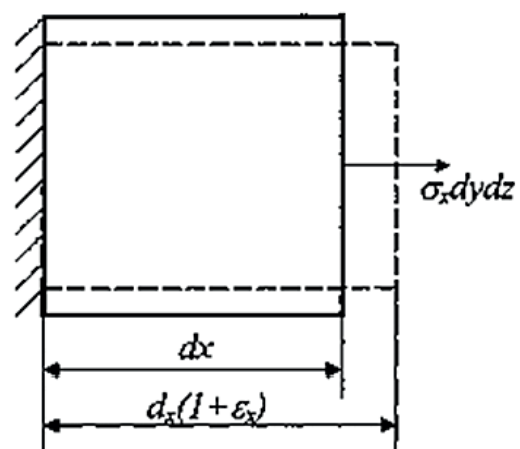


Рисунок 1 – Расчетная схема энергии деформации  $\sigma_x d_y d_z$   
Figure 1 – Deformation energy  $\sigma_x d_y d_z$  calculation scheme

в процессе деформации, как и удельная энергия деформации, равны 0:

$$\Phi = dU / dV = 0 \quad (7)$$

А это означает, что горный массив при неизменном объёме и форме физически не может накапливать энергию упругих деформаций. Следовательно, все теории, построенные на ошибочном выводе Рейда – Рихтера о накоплении горным массивом энергии деформаций, несостоятельны и вредны. Именно эта грубейшая ошибка завела сейсмологию в глухой тупик, из которого учёные не могут найти выход вот уже многие десятилетия, год за годом наматывая теоретические круги вокруг гипотез Резиновой отдачи и Зацепов. Это ошибка хорошо видна и становится очевидной на примере воздействия на земную кору лунных приливов и отливов. Если бы горные массивы физически могли накапливать энергию деформаций, то лунные приливы, заставляющие ежесуточно дышать земную кору, за несколько лет так бы “накачали” породы земной коры энергией, что нашему миру пришлось бы существовать при постоянных катастрофических землетрясениях. С другой стороны, влияние Земли на Луну намного интенсивнее и хватило бы несколько лет “накачки”, чтобы разорвать Луну накопленной потенциальной энергией земных приливов. И это ещё не всё. Для полноты картины следует прибавить сюда “накачку” от силы притяжения Солнца. Последнее, что хотелось бы отметить по поводу накопления энергии массивом – это знаменитые горизонтальные и вертикальные “Зацепы” тектонических плит и блоков, о которых всегда и во всех гипотезах упоминают приверженцы Рейда – Рихтера как об основном источнике аккумуляции энергии землетрясений. Согласно прочностным характеристикам горных пород, кварц является одной из прочнейших пород с пределом прочности на сжатие около *500 Mna*. Возникает закономерный вопрос: как можно соотнести порог разрушения прочного кварца с давлением в горном массиве в месте соприкосновения тектонических плит и блоков, достигающего величин нескольких ГПа? То есть давления образования алмазов и давления, способного легко “выпучивать” из земной коры горные системы типа Гималаев и достигать величин в миллионы раз больше предельного порога разрушения любой породы? Очевидно, что в момент контакта поверхности соприкосновения тектонических плит всевозможные “Зацепы” будут мгновенно превращены в молекулярные обломки пород с выделением и рассеиванием энергии деформации в виде тепла и энергии процесса метаморфизма, который

вызовет глубокие изменения в структуре окружающих пород. Под воздействием давления контактируемых поверхностей на фоне разрушения слоев горных пород будет происходить их кристаллизация и перекристаллизация с последующим накоплением в зоне контакта этого вновь и вновь новообразующегося материала в течение длительных геологических периодов. Процесс непрерывного накопления метаморфических пород в зоне контакта плит даст старт процессу деформационного пучения земной коры (процесс горообразования) и последующим тектогенезом — процессом пластической деформации слоёв горного массива без нарушения их сплошности, приводящему к возникновению в горном массиве изгибов разного масштаба и формы (например, различного рода складки, волнистость, синклинали, антиклинали). Говоря о движении и столкновении тектонических плит или отдельных блоков земной коры, как источнике землетрясений, мы ни в коем случае не можем говорить об упругих деформациях. И тем более мы не имеем права говорить о накоплении деформационной энергии горным массивом, ибо при высокоэнергетическом взаимодействии тектонических плит и блоков горного массива все деформации являются пластическими, и большая часть механической энергии этих деформаций рассеивается за короткий промежуток времени на процессы горообразования. Мы полагаем, что сложившиеся стереотипы существующих гипотез аккумуляции массивом энергии деформаций и огромная инерционность мышления исследователей подвижек земной коры остаётся главным препятствием решения и понимания вопроса: откуда, каким образом и в какой форме горный массив черпает энергию, способную совершать работу по созданию сейсмического или горного удара. Суммируя опыт наблюдений за землетрясениями, горными ударами и внезапными выбросами, можно с уверенностью сказать, что энергия подземных толчков образуется при изменении горного давления в массиве и многократного перехода кинетической энергии в потенциальную и, наоборот, в результате механо-электро-магнитических явлений в массиве и перехода одних форм энергии в другие. Чтобы наглядно объяснить, как образуется энергия землетрясений, горных ударов и внезапных выбросов, предлагаем рассмотреть несколько примеров. Как мы выяснили выше, кинетическая энергия покоящегося массива всегда близка к нулю (принцип минимума энергии) и возникает только в момент молекулярно-структурных перестроек массива при переходе потенциальной

энергии его объёмного сжатия в кинетическую энергию движения электронов пород горного массива. Значит, мы можем констатировать важный вывод, что стартом и движущей силой любого землетрясения, горного удара и внезапного выброса служит только потенциальная энергия горного давления. Но при стабильном состоянии горного массива подчёркиваем, что при стабильном состоянии, его потенциальная энергия, как и кинетическая, находится на минимуме (близка к нулю). Значит, мы можем констатировать следующий и окончательный вывод: стартом и движущей силой любого землетрясения, горного удара и внезапного выброса служит потенциальная энергия горного давления, потерявшего устойчивость горного массива. Как мы знаем, потенциальная энергия системы (массива) описывается его взаимодействием с некоторым полем в некоторой точке и зависит от трех факторов: напряженности поля, координаты, описывающей точку, в которой находится массив, и способности массива воспринять данное поле. Эта способность массива воспринять данное поле является важнейшей характеристикой тела, которая объясняет, откуда в горном массиве появляется энергия сейсмического удара, а также объясняет и всю суть процесса подвижек земной коры. Именно в способности массива воспринимать электромагнитное поле заключено решение образования энергии землетрясений и построена теория деформационного взрыва, суть которого заключена в следующем и весьма простом положении: если в массиве нет электрического заряда  $q$ , то есть, если он равен нулю, электрическое поле “не существует” для данного участка массива, и его энергия равна нулю или близка к нему. Это верно и для магнитного поля. Если у массива нет магнитного момента, он не будет реагировать на магнитное поле и энергия массива будет также близка к нулю. Всё это легко понять, представив вместо элементарного объёма горного массива бочку с порохом, которая находится в пороховом погребе и энергия которой равна минимуму и мало отличается от нуля. Как бы мы ни пытались сообщить ей дополнительную энергию, долго катая бочку по трюму, как бы ни сталкивали её с другими бочками, как бы ни нагружали её, помещая под другие бочки, вплоть до её механического разрушения, энергия системы «бочка + порох» будет близка к нулю и не повысится ни на джоуль. Следовательно, ни о каком накоплении энергии бочкой, которая может реализоваться взрывом, говорить не приходится. Но стоит поднести маленькую искру с энергией в десятые и даже сотые доли Джоуля к поро-

ху, как система выделит такое количество энергии, что её хватит, чтобы разворотить пороховой погреб. То есть не мифическая энергия деформации стенок бочки и всей системы «бочка+порох», а тепловой заряд даст старт целому ряду химических реакций и превращений, которые выделяют при этом энергию взрыва пороха. То же самое происходит и при землетрясении, когда не накопленная мифическая энергия деформаций горного массива, а электрический заряд в горном массиве даёт старт целому ряду механо-электромагнитных и химических явлений и превращений, в результате которых выделяется энергия подземных толчков, горных ударов и внезапных выбросов. В последние годы учёные, разочарованные отсутствием результатов по исследованиям сейсмических процессов, предположили, что механизм землетрясений не лежит в основании одного физического явления, а представляет собой сложнейший многоступенчатый механизм на основе различных по природе физических явлений [7]. Похожие подозрения высказал известный новозеландский сейсмолог Д. Эйби, который заявил, что, возможно, большая часть энергии землетрясения высвобождается не от разрядки упругих напряжений массива, а от чего-то другого, а всё остальное только формы сейсмической активности [8]. То есть учёные наконец-то допустили, что не только энергия упругих деформаций является причиной землетрясений, но и другие виды энергий ответственны за происхождение подземных толчков, т.е. комбинация различных по природе факторов и явлений. В работах [9,10,11] именно комбинациями механизмов образования и реализации энергии горного массива дано объяснение природы землетрясений, горных ударов и внезапных выбросов в шахтах. Гипотеза деформационного взрыва, описанная в этих работах, с появлением на “сцене” события электрического заряда в горном массиве и вызванный им ток самоиндукции проясняют, как возникает и реализуется энергия, как в горных породах появляются свободные радикалы или ионы, как начинается процесс цепной химической реакции перехода газов из твёрдого раствора в газообразное состояние, выделение которых в огромных количествах мы наблюдаем при землетрясениях и внезапных выбросах, как энергия, выделившаяся вследствие изменения формы кристаллической решётки после исхода газов и вследствие разного рода стрикций и процесса магнитопластичности, в конечном итоге вызывают сейсмический удар. Упрощая ситуацию до уровня начальной школы, можно сказать, что электрический заряд

в атмосфере вызывает молнию, электрический заряд в воде вызывает гидравлический удар [12,13 видеофайл], а электрический заряд в горном массиве вызывает землетрясение.

#### Заключение:

Мы согласны, что у разных исследователей сейсмических процессов может быть разное отношение к изложенному в статье теоретическому материалу. Но, независимо от этого, развенчав столетний миф Рейда – Рихтера об аккумуляровании горным массивом энергии деформаций, превратившийся в догму и заведший сейсмологию в тупик исследований, мы считаем, что выполнили одну из поставленных задач, заявленных в начале исследования. Хочется отметить, что гипотеза деформационного взрыва пород постепенно приобретает черты полноценной теории. Надеемся, что представленная в статье гипотеза придаст новое направление исследованиям и поможет учёным в успешной разработке полноценной теории землетрясений. Внезапные выбросы и горные удары в шахтах заслуживают не меньшего внимания в целях предотвращения подземных катастроф и гибели шахтёров. Говоря о землетрясениях, надо иметь

в виду, что динамические процессы в шахтах являются частными случаями землетрясений, то есть, говоря о них, мы должны подразумевать землетрясения локального масштаба. К слову, в деле прогноза и предотвращения горных ударов и внезапных выбросов в шахтах горные инженеры, в отличие от сейсмологов, достигли определённых практических результатов [14]. В настоящее время ими разработаны как технологические методы борьбы с динамическими явлениями в шахтах, так и технические. И хотя горные инженеры связаны той же ошибкой, что и сейсмологи, считая, что горный массив западает энергию выбросов и горных ударов, они, в отличие от сейсмологов, имеют возможность “пощупать” очаг выброса и буквально вслепую найти несколько удачных отгадок этой проблемы. Достигнутые горными инженерами успехи и представленный в статье материал убедительно опровергают мнения некоторой части исследователей в абсолютной непредсказуемости и случайности подвижек земной коры и показывают возможные пути решения задач прогноза и предотвращения землетрясений, горных ударов и внезапных выбросов газа и пород.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Литовченко И.Н. О типах очагов землетрясений, их модели и формирование. Режим доступа: <http://www.sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st4977.pdf>
2. Бучаченко А.Л. Магнитопластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу? // Успехи физических наук. 2014. Т. 184. № 1. С. 101-108.
3. Кругляков Э. П. Учёные с большой дороги. М.: Наука, 2001. С. 187.
4. Гуфельд И. Л. Возможен ли прогноз сильных коровых землетрясений? // Вестник Российской академии наук. 2013. Т. 83. № 3. С. 236–245.
5. Сторчеус А. В. Заметки к методике расчёта сейсмической энергии взрывов и землетрясений. Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 683006. Режим доступа: <http://leo.gdirc.ru/files/libs/3.pdf>
6. Закон Гутенберга-Рихтера. Режим доступа: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD\\_%D0%93%](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%93%)
7. Ребецкий Ю. Л. Современное состояние теорий прогноза землетрясений. Результаты оценки природных напряжений и новая модель очага землетрясений Режим доступа: <http://yak.ifz.ru/pdf-lib-yak/Pages359-395.pdf>
8. Эйби Дж. А. Землетрясения. М.: Недра, 1982. С. 101.
9. Бычков С.В. Химические реакции в процессе землетрясений. Взрывы пород горного массива как источник толчков, внезапных выбросов и горных ударов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2016. № 4. С. 36-47.
10. Бычков С.В. Движение электрического заряда, цепная химическая реакция, магнитострикция как источники землетрясений и внезапных выбросов // Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 2. Режим доступа: <file:///C:/Users/EVGENY/Downloads/dvizhenie-elektricheskogo-zaryada-tserpnaya-himicheskaya-reaktsiya-magnitostriksiya-kak-istochniki-zemletryaseny-i-vnezapnyh.pdf>
11. Бычков С.В. Критический обзор статьи “Магнито пластичность и физика землетрясений. Можно ли предотвратить катастрофу\*”? Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности. 2017. № 4. С. 68-73.
12. Удар молнии в реку. Режим доступа: <https://yandex.ru/video/search?filmId=>
13. Искровой разряд в воде // [www.youtube.com/watch?v=vBqwFeaFsGs](http://www.youtube.com/watch?v=vBqwFeaFsGs)
14. Вернигор В.М., Кульчицкий В.Б., Кульчицкий С.В. Предупреждение горных ударов и внезапных выбросов в горнодобывающей промышленности. Режим доступа: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/1071-preduprezhdenie-gornyx-udarov-i-vnezapnykh-vybrosov-v-gornodobyvayushchej-promyshlennosti>

#### REFERENCES

1. Litovchenko, I.N. On the types of earthquakes foci, their models and formation]. Retrieved from: <http://www.sciteclibrary.ru/texts/rus/stat/st4977.pdf> [in Russian].

2. Buchachenko, A.L. (2014). Magnitoplastichnost i fizika zemletriasenii. Mozhno li predotvratit katastrofu? [Magnetoplasticity and the physics of earthquakes. Is it possible to prevent a catastrophe?]. *Uspekhi fizicheskikh nauk – Physical sciences successes*, 1, 101-108 [in Russian].
3. Krugliakov, E.P. (2001). Uchenyie s boshoi dorogi [Scientists from the big road]. Moscow: Nauka [in Russian].
4. Gufeld, I.L. (2013). Vozmozhn li prognoz silnykh korovykh zemletriasenii? [Is it possible to forecast strong crust earthquakes?]. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk - Bulletin of the Russian Academy of Sciences*, V 83, 3, 236-245 [in Russian].
5. Storcheus, A.V. (). Zametki k metodike rascheta seismicheskoi energii vzryvov i zemletriasenii [Notes to explosions and earthquakes seismic energy calculation methodology]. Far East Branch of RAS, Institute of Volcanology and Seismology. Retrieved from: <http://leo.gdirc.ru/files/libs/3.pdf> [in Russian].
6. Gutenberg – Richter Law. Retrieved from: [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD\\_%D0%93%](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%93%) [in Russian].
7. Rebetski Yu.L. (). Sovremennoie sostoianie teorii prognoza zemletriasenii. Rezultaty otsenki prirodnykh napriazhenii i novaia model ochaga zemletriasenii [The current state of the earthquake forecast theories. The results of natural stresses assessment and a new model of earthquake foci]. Retrieved from: <http://yak.ifz.ru/pdf-lib-yak/Pages359-395.pdf> [in Russian].
8. Eibi, G.A. (1982). *Zemletriaseniia [Earthquakes]*. Moscow: Nedra [in Russian].
9. Bychkov, S.V. (2016). Himicheskie reaktsii v protsesse zemletriasenii. Vzryvy porod gornogo massiva kak istochnik tolchkov, vnezapnykh vybrosov i gornykh udarov [Chemical reactions in the process of earthquakes. Explosions of rock massif rocks as a source of shocks, sudden outbursts and rock shocks]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 4, 36-47 [in Russian].
10. Bychkov, S.V. (2017). Dvizhenie elektricheskogo zariada, tsepnaia khimicheskaiia reaktsiia, magnitostriksiia kak istochniki zemletryasenii i vnezapnykh vybrosov [Electric charge movement, chain chemical reaction, magnetostriction as sources of earthquakes and sudden outbursts]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 2. Retrieved from: <file:///C:/Users/EVGENY/Downloads/dvizhenie-elektricheskogo-zaryada-tsepnaya-himicheskaya-reaktsiya-magnitostriksiya-kak-istochniki-zemletryaseniy-i-vnezapnykh.pdf> [in Russian].
11. Bychkov, S.V. (2017). Kriticheskii obzor stati “Magnito plastichnost i fizika zemletriasenii. Mozhno li predotvratit katastrofu”? [A critical review of the article “Magneto plasticity and the physics of earthquakes. Is it possible to prevent a catastrophe ?”]. *Vestnik nauchnogo tsentra po bezopasnosti rabot v ugolnoi promyshlennosti – Herald of Safety in Mining Industry Scientific Center*, 4, 68-73 [in Russian].
12. Udar molnii v reku [Lightning strike in the river]. Retrieved from: <https://yandex.ru/video/search?filmId=> [in Russian].
13. Iskrovoi razriad v vode [Spark discharge in water]. Retrieved from: <http://www.youtube.com/watch?v=vBqwFeaFsGs> [in Russian].
14. Vernigor, V.M., Kulchitski, V.B., & Kulchitski S.V. (). Preduprezhdenie gornykh udarov i vnezapnykh vybrosov v gornodobyvaiushchei promyshlennosti [Prevention of mountain rock shocks and sudden outbursts in the mining industry]. Retrieved from: <https://mining-media.ru/ru/article/newtech/1071-preduprezhdenie-gornykh-udarov-i-vnezapnykh-vybrosov-v-gornodobyvayushchej-promyshlennosti> [in Russian].

## ТРЕБОВАНИЯ К РАЗМЕЩЕНИЮ РЕКЛАМНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Научно-технический журнал «Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности» приглашает научные институты, организации и промышленные предприятия разместить информацию о конференциях, выставках, разрабатываемой и выпускаемой продукции в области охраны труда, безопасности в чрезвычайных ситуациях, пожарной и промышленной безопасности в угольной промышленности, контроля природной среды, веществ, материалов и изделий, а также приборостроения.

### РАЗМЕРЫ РЕКЛАМНЫХ МОДУЛЕЙ:

- размер для 1 полосы: 216\*303 мм, включая по 3 мм на обрезку с каждой стороны внешнего периметра, на корешок допуск ставить не нужно.
- 1/2 полосы вертикальная: 103\*303 мм,
- 1/2 полосы горизонтальная: 216\*151 мм
- 1/3 полосы горизонтальная: 216\*92 мм
- 1/4 полосы горизонтальная: 216\*67 мм
- 1/4 полосы вертикальная в верхнем или нижнем внешнем углу страницы: 103\*151 мм

### ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ СТАТЬЯМ

1. Текст для статьи предоставляется только в текстовом редакторе Word.
2. Объем статьи: не более 4500 печатных знаков с пробелами (без изображений). При использовании фотографий объем текста пропорционально уменьшается.
3. Требования к фотографиям: формат *.eps* или *.tiff* с разрешением 300 dpi.
4. Логотип – в форматах *.cdr*, *.eps*, при этом шрифты должны быть переведены в кривые.
5. Текст рекламной статьи должен включать заголовок (подзаголовок), выходные данные заказчика: название, адрес, телефон, электронный адрес компании.

### ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МАКЕТАМ

1. Размер электронного макета должен соответствовать размерам рекламного модуля.
2. Растровые файлы должны быть в форматах *.tif*, *.psd*, *.eps* с разрешением 300 dpi, векторные – *.ai*, *.eps* и *.cdr*.
3. Оригинал-макеты передаются в цветовой модели CMYK без компрессии.
4. Верстка может быть в форматах Adobe Illustrator, Corel Draw, Adobe InDesign (в этом случае должны предоставляться все связанные элементы, а также все используемые шрифты, обязательно макет должен так же прилагаться в pdf).
5. В макете, подготовленном в пакете Corel Draw не допускается наличие следующих эффектов: shadow, transparency, gradient fill, lens, texture fill и postscript fill. Все вышеперечисленные эффекты Corel Draw должны быть конвертированы в bitmap 300 dpi.
6. Черный цвет текста должен состоять только из черного канала – C:0, M:0, Y:0, K:100 или 100 Black в одноцветной шкале Grayscale.
7. Все текстовые элементы оригинал-макета должны быть переведены в кривые.
8. Текст и важные изображения (логотип и т. п.) не должны располагаться ближе 5 мм к обрезному краю.

Информация о расценках на размещение рекламы размещена на сайте [www.ind-saf.ru](http://www.ind-saf.ru).

**Редакция журнала оставляет за собой право отбора поступивших рекламных материалов.**





**indsafe.ru**

ООО «ВостЭКО»

Уважаемые партнёры!

**Редакция журнала «Вестник»  
предоставляет вам возможность  
размещения рекламных и  
информационных материалов на  
страницах нашего издания и на  
сайте журнала.**

Журнал адресован профессионалам и одинаково полезен как ученым, аспирантам, студентам вузов, так и практикам – руководителям высшего и среднего звена, а также инженерно-техническим работникам. «Вестник» – это уникальное в своем роде научно-техническое издание по вопросам промышленной безопасности, входящее в перечень журналов ВАК.

**Журнал "Вестник" – это  
эффективная возможность для  
размещения рекламы:**

Обращаем внимание на соответствие исходных материалов требованиям редакции.

Рекламные модули должны быть в форматах eps, pdf или tif разрешением 300 dpi. Другие технические требования уточняйте в редакции

Тираж издания: **1000** экземпляров

Периодичность выхода: **4** раза в год

Формат: **A4**

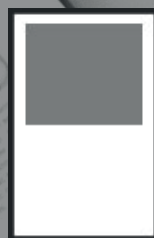
Предусмотрены скидки в зависимости от объема и количества публикаций.

Контакты редакции журнала «Вестник»  
г Кемерово, Сосновый бульвар, 16, оф 228  
тел/факс: 8 (3842) 340670  
email: [dtrubitsyna@gmail.com](mailto:dtrubitsyna@gmail.com)

**ind-saf.ru**



A4



1/2 A4



2 A4 - разворот



1/4 A4 (горизонтальная  
полоса)



1/4 A4 (вертикальная  
полоса)

# ТРЕБОВАНИЯ, УСЛОВИЯ И ПОРЯДОК ПРЕДСТАВЛЕНИЯ РУКОПИСЕЙ В НТЖ «Вестник Научного центра по безопасности работ в угольной промышленности»

## ***I. Порядок представления материалов в редакцию***

1. В журнал принимаются статьи, соответствующие его тематике – охрана труда, безопасность в чрезвычайных ситуациях, пожарная и промышленная безопасность в угольной промышленности, приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

2. Статья должна быть оригинальной, не представленной в других изданиях.

3. На основании положений части четвертой Гражданского кодекса Российской Федерации (раздел VII «Права на результаты интеллектуальной деятельности и средства индивидуализации») представляемые в журнал статьи должны сопровождаться лицензионным договором о передаче ООО «ВостЭКО» (издатель журнала) простой (неисключительной) лицензии. Договор заполняется на бланках по образцам лицензионных договоров с одним или коллективом авторов (при написании статьи несколькими авторами). Лицензионный договор является договором присоединения. Необходимо заполнить и подписать договор, отсканированный вариант отправить по e-mail: yarosh\_mv@mail.ru, два первых экземпляра оформленного договора отправить в редакцию по почте: 650002, Кемерово, Сосновый бульвар, д. 1, ООО «ВостЭКО». Договор, подписанный автором/авторами и направленный по электронной почте, признается равнозначным документу на бумажном носителе, подписанному собственноручной подписью, порождающим права и обязанности сторон. Скачать бланки договора можно на сайте [www.indsafe.ru](http://www.indsafe.ru).

## ***II. Форма представления рукописи***

1. Рукопись представляется отпечатанной в текстовом редакторе Word через 1,5 интервала на одной стороне стандартного листа белой бумаги формата А4 и в электронном виде (передается по электронной почте yarosh\_mv@mail.ru или на магнитном носителе).

2. Все страницы рукописи, включая таблицы, список литературы, рисунки должны быть пронумерованы. Рекомендуемый объем статьи 5–7 страниц. Статья должна быть подписана всеми авторами.

3. Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

## ***Подготовка электронной версии материалов***

1. Текст набирается шрифтом Arial, размер шрифта 10, для заголовка 14, полуторный интервал, абзацный отступ 1,25 см, формат листа А4. Поля с левой стороны 3 см, сверху и снизу 2 см, справа 1,5 см;

2. Электронная версия должна быть идентична распечатанному тексту. В случае расхождения за основу берется печатный вариант.

## ***Структура статьи***

1. Индекс УДК.

2. Фотографии всех авторов (форматы: TIF, Jpeg, Png, не сканированные, не ретушированные, не обрезанные, разрешение 300 dpi).

3. Инициалы и фамилия автора (ов).

4. Место работы.

5. Название статьи.

6. Реферат. *Реферат должен быть информативным, отражать основное содержание статьи и результаты исследований, следовать логике описания результатов в статье, укладываться в объем от 100 до 250 слов. Возможно краткое повторение структуры статьи, включающей введение, цели и задачи, методы, результаты, заключение.*

7. Ключевые слова.

8. Текст статьи с таблицами, иллюстрациями, формулами.

9. Список литературы (оформленный в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5 - 2008 «Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления»).

На отдельном листе или в конце статьи размещается «Список авторов», который должен содержать:

- публикуемые сведения об авторах (название организации указывается в соответствии с учредительными документами);
- служебные или домашние адреса с указанием почтового индекса;
- адрес электронной почты (e-mail).

Обращаем ваше внимание, что представление оригинальной статьи к публикации в НТЖ означает согласие авторов на передачу права на воспроизведение, распространение и доведение произведения до всеобщего сведения любым способом.

*Редколлегия*



**ind-saf.ru**  
Новый сайт журнала "Вестник"

**СЛОВО РЕДАКТОРА // EDITORIAL**

**5** Трубицына Н. Trubitsyna N.

**I. ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ И ГЕОМЕХАНИКА // INDUSTRIAL SAFETY AND GEOMECHANICS**

**8** Е.Н. Козырева, А.А. Рябцев. Газодинамическая активность угольного пласта и необходимость применения его дегазации  
Ye.N. Kozyreva, A. A. Riabtsev. A coal seam gas dynamic activity and its degasing application necessity

**14** Е.Н. Козырева, М.В. Шинкевич, С.Р. Смирнов, В.Ф. Исамбетов. Необходимость применения пластовой дегазации по уточненной газоносности пласта (на примере лавы № 449 шахты «Чертинская- Коксовая»)  
Ye.N. Kozyreva, A. A. Riabtsev. Necessity to use the seam degassing according to the seam verified gas content (on the example of the longwall no. 449 Of "Chertinskaia-Koksovaia" mine)

**II. ПОЖАРНАЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ // FIRE AND INDUSTRIAL SAFETY**

**20** С.А. Лисаков, Е. В. Сыпин, Н.Ю. Тупикина, Ю.А. Галенко, О.Б. Кудряшова, А.Н. Павлов. Постановка задачи моделирования процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах  
S.A. Lisakov, EV Sipin, N.Yu. Tupikina, Yu.A. Galenko, O.B. Kudryashova, A.N. Pavlov. Methane-air mixture nonstationary combustion process in coal mines modeling task statement

**33** Д.Е. Скударнов, В.А. Портола, А.А. Квасова, А.В. Сачков. Анализ смертельного травматизма при добыче угля открытыми горными работами  
D.Ye. Skudarnov, V.A. Portola, A.A. Kvasova, A.V. Sachkov. Analysis of fatal traumatism in opencast coal mining operations

**40** С.А. Лисаков, Е. В. Сыпин, А.Н. Павлов, Ю.А. Галенко. Моделирование процесса нестационарного горения метано-воздушной смеси в угольных шахтах  
S.A. Lisakov, EV Sipin, A.N. Pavlov, Yu.A. Galenko. Modeling of methane-air mixture nonstationary combustion process in coal mines

**54** Е.А. Петров, П.И. Савин, Н.П. Вдовина. Исследование влияния концентрации ингибирующих добавок на химическую стойкость эмульсионных взрывчатых веществ в среде пирита  
Ye.A. Petrov, P.I. Savin, N.P. Vdovina. Anvestigation of concentration inhibit addition of resistance to chemicals emulsion explosives in a pyrite

**59** А.И. Фомин, Ю.А. Фадеев, И.М. Анисимов. Исследования этапов формирования профессиональных заболеваний у работников, занятых в технологических процессах при разработке угольных месторождений открытым способом  
A.I. Fomin, Yu.A. Fadeyev, I.M. Anisimov. Workers employed in technological processes of open cast mining occupational diseases formation stages research

**67** А.И. Фомин, Д.А. Бесперстов, В.Б. Попов, С.Ю. Сайбель. Обеспечение пожарной безопасности при скрытых рисках гибели людей на угольных предприятиях  
A.I. Fomin, D.A. Besperstov, V.B. Popov, S.Yu. Saybel. Fire safety with hidden risks of life loss at coal enterprises

**73 А.И. Фомин, Д.А. Бесперстов, В.Б. Попов, С.Ю. Сайбель.** Влияние единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций на риск гибели людей при пожарах  
**A.I. Fomin, D.A. Besperstov, V.B. Popov, S.Yu. Saybel.** The impact of the unified state system of prevention and liquidation of emergency situations at the risk of loss of life in fires

### **III. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ БЕЗОПАСНОСТИ ГОРНЫХ РАБОТ // TECHNOLOGICAL QUESTIONS OF MINING WORK SAFETY**

**77 А.В. Шадрин, В.И. Клишин.** Установление связи параметров акустической эмиссии с фильтрационно-коллекторскими свойствами массива и характеристиками насосной установки при гидрообработке кровли и угольного пласта  
**A.V. Shadrin, V.I. Клишин.** Connection of acoustic emission parameters with filtration-collective properties of the massif and the pump unit performance for hydraulic processing of roof and coal-layer

**88 П.Б. Герике.** Поиск универсального критерия для оценки степени деградации фактического состояния генераторных групп экскаваторов-драглайнов  
**P.B. Gerike.** A universal criterion search for assessing the dragline generator groups' actual state degradation degree

### **IV. ПРОБЛЕМЫ И СУЖДЕНИЯ // PROBLEMS AND OPINIONS**

**96 Е.Н. Карнадуд, А.А. Ярошик.** Современные тенденции в области обеспечения безопасности производственного персонала на предприятиях угольной промышленности  
**Ye.N. Karnadud, A.A. Yaroshik.** Modern trends in production personnel safety provision at coal industry enterprises

**102 С.В. Бычков.** Горный массив как аккумулятор энергии землетрясений, горных и внезапных выбросов. Миф или реальность?  
**S.V. Vychkov.** Rock massive as the earthquake, rock shocks and sudden outbursts energy accumulator. Myth or reality?

### **112 ТРЕБОВАНИЯ К РЕКЛАМНЫМ МАТЕРИАЛАМ // ADVERTISING MATERIALS REQUIREMENTS**

### **114 ТРЕБОВАНИЯ К СТАТЬЯМ // DEMANDS TO ARTICLES**

### **116 СОДЕРЖАНИЕ // CONTENT**

Подписано в печать 20.03.2018. Тираж 1000 экз. Формат 60x90 1/8.  
Выпуск 1-2018, дата выхода в свет 23.03.2018  
Объем 10 п. л. Заказ № 1 2018 г. Цена свободная.  
Типография ООО «ИНТ».  
650065, Россия, Кемеровская область, г. Кемерово, пр-т Октябрьский, 28 офис 215  
Тел. 8 (3842) 657889.