

УДК 622.41:622.81

МУЛЬТИПЛИКАТИВНЫЙ МЕТОД ОЦЕНКИ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ СВОЙСТВ РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЫ ПРИ ПОСТУПЛЕНИИ В ВОЗДУШНУЮ СРЕДУ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ



В. А. РОДИОНОВ,
доцент, канд. техн. наук,
Rodionov_VA@pers.spmi.ru



А. С. СЕРЕГИН,
доцент, канд. техн. наук



Д. А. ИКОННИКОВ,
доцент, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

В настоящее время на территории Российской Федерации в рабочем режиме эксплуатируется около 260 объектов подземных горных работ [1–3]. В угольной промышленности работают 92 угольные шахты, на объектах нефтегазодобывающей промышленности эксплуатируются 3 нефтешахты, остальные 168 подземных рудников (шахт) принадлежат горнорудной и нерудной отраслям промышленности. Анализ статистических данных, прежде всего содержащихся в отчетах Ростехнадзора, а также научно-исследовательских и литературных источников, позволяет сделать ряд неутешительных выводов, что принимаемые меры по недопущению аварий и инцидентов, а также по профилактике различного рода нештатных ситуаций, приводящих к чрезвычайным ситуациям (ЧС) различного рода, в том числе и гибели персонала и горноспасателей на этих объектах, недостаточны [1, 2, 4]. Например, только за десятилетний период произошло 67 аварий, на которых были смертельно травмированы 297 человек. В среднем за год произошло 6,7 аварий и были смертельно травмированы около 30 человек. При этом в какие-то годы наблюдалось значительное

Приведены краткие статистические данные о численности аварий и смертельно травмированных рабочих на объектах подземной добычи полезных ископаемых. Сделан вывод о недостаточности принимаемых мер для предотвращения чрезвычайных ситуаций. В качестве метода оценки взрывоопасных свойств рудничной атмосферы предложено использовать мультипликативный метод. Рекомендовано разработать методику оценки взрывопожароопасности рудничной атмосферы, учитывающую более широкий спектр веществ, которые могут поступить в горные выработки в результате осуществления тех или иных технологических процессов.

Ключевые слова: рудничная атмосфера, рудник, нефтешахта, аналитическая хроматография, масс-спектрометрия, взрывопожароопасность, вредные газы, жидкие углеводороды

DOI: 10.17580/gzh.2023.09.05

снижение числа аварий и смертельно травмированного персонала. Следует отметить, что снижение числа аварий и травмированного персонала обычно наблюдается после достижения максимума, и через 3 года или 5 лет опять имеет место рост аварийности и травмирования людей. Это свидетельствует о том, что предпринимаемых мер по внедрению современных многофункциональных систем безопасности, их совершенствованию, а также цифровизации объектов ведения подземных горных работ недостаточно, и необходимо уделять внимание другим способам, позволяющим своевременно выявлять и предотвращать негативные процессы, приводящие к возникновению инцидентов и аварий на такого рода объектах [1, 5]. На основе анализа научно-публицистических данных и различного рода информации, содержащейся в отчетах Ростехнадзора, авторами установлено, что большое число смертельно травмированных человек наблюдается там, где причиной трагедии, как правило, являлись сложные физико-химические процессы горения. Под сложными физико-химическими процессами горения понимают совокупность процессов накопления/образования в пространстве горных выработок пыле-, газо- и паровоздушных гибридных смесей, их окисление кислородом воздуха, а также возникновение эндогенных и/или экзогенных очагов горения. Это обуславливает возникновение условий для взрыва такого рода смесей. Таким образом, необходимо уделить особое внимание данным, которые можно получить при мультипликативной (комплексной и всесторонней) оценке физико-химических свойств пыле-газо- и паровоздушных составляющих рудничной атмосферы [6–8].

Первые шаги в этом направлении уже сделаны. Во многие нормативно-правовые акты внесены существенные уточнения: ранее встречаемый термин «атмосфера» после уточнения заменен на «рудничная атмосфера». Термин «рудничная атмосфера» начали использовать более 50 лет назад, но возможно многие просто забыли, что рудничная атмосфера – это сложное многокомпонентное газообразное образование [8, 9]. В первую очередь она состоит из рудничного воздуха, содержащего токсичные и/или пожаровзрывоопасные газо- и паровые вещества, поступающие из порового пространства горного массива, а также газообразные продукты окисления веществ, из которых состоит извлекаемая горнопородная масса и добываемое сырье [10–12]. Во-вторых, основная ее часть представлена атмосферным воздухом, который подается средствами вентиляции и по мере прохождения по горным выработкам претерпевает теплофизические изменения, меняется его температура и влажность. Поэтому внесенная в целый ряд нормативно-правовых актов поправка заставит специалистов по-новому взглянуть не только на вопросы аэрологической безопасности, но и в целом на процессы образования взрывопожароопасных гибридных смесей и возможность их воспламенения/взрыва [13–15]. В связи с тем, что наиболее изученными в плане оценки взрывопожароопасных свойств рудничной атмосферы (РА) являются угольные шахты и рудники по добыче различных неорганических полезных ископаемых (полиметаллов, строительного сырья), авторы в качестве объекта и предмета исследования выбрали нефтяные шахты. Актуальность поиска нового мультипликативного метода оценки рудничной атмосферы шахт и рудников на примере нефтешахт вызвана произошедшими на них авариями, а также обращением большого количества различных токсичных и взрывопожароопасных компонентов, образующихся в процессе ведения технологического процесса, и ценностью добываемого сырья, применяемого в нефтехимической, медицинской, строительной и других отраслях промышленности [1, 2, 16]. Кроме того, в пространстве горных выработок нефтяных шахт, а также ряда рудников, в которых наблюдались нефтепроявления, можно обнаружить практически все компоненты, встречающиеся в том или ином количестве в рудничной атмосфере других объектов подземной добычи [1, 17, 18].

Методология исследований

Методология оценки рудничной атмосферы основана на применении прикладных методов математической статистики и обработки экспериментальных данных, методов отбора проб, специальной пробоподготовки и аналитических методов анализа отобранных образцов. В связи с необходимостью применения нестандартного подхода к оценке взрывопожароопасных свойств рудничной атмосферы, сочетающего в себе несколько методов, выбранный метод был назван мультипликативным, т. е. множественным, объединяющим в себе совокупность ряда методов. При этом за основу были взяты

методы аналитической хроматографии и масс-спектрометрии (МС) [19, 20]. Мультипликативный метод оценки взрывопожароопасности РА учитывает требования «Правил безопасности в нефтяной и газовой промышленности», утвержденных Приказом Ростехнадзора от 15 декабря 2020 г. № 534 (далее ПБвНиГП). В конечном варианте мультипликативный метод будет учитывать газовый состав рудничной атмосферы и возможность поступления в эту атмосферу вредных газов и паров жидких углеводородов. Под вредными газами в данном случае, согласно ПБвНиГП, следует понимать: монооксид углерода (CO); оксиды азота (в перерасчете на NO₂); сернистый ангидрид (SO₂) и сернистый водород (H₂S). Вредные газы определяют при стандартном пробоотборе и анализе проб хроматографическими методами в контрольно-измерительных лабораториях (КИЛ) Военизированной горноспасательной части (ВГСЧ), поэтому процесс их анализа в данной статье не рассматривается. Углеводородные газы – метан, этан, пропан, бутан, из которых, в соответствии с ПБвНиГП, к высшим углеводородным газам относят только этан, пропан, бутан и изобутан, также определяют при стандартном пробоотборе и анализе проб газохроматографическими (ГХ) методами в КИЛ [21, 22].

В настоящей статье при оценке взрывопожароопасности рудничной атмосферы при поступлении в воздушную среду углеводородных газов необходимо учитывать возможное наличие в РА метана, вредных газов и высших углеводородных газов, а также постоянное поступление в пространство горных выработок веществ, образующихся в результате протекания сложных физико-химических процессов (тепломассопереноса, акватермолиза нефти, испарения, ван-дер-ваальсовых сил и др.). Именно на эти вещества (в основном, пары жидких углеводородов), а также на водород авторы и обратили внимание в своих исследованиях [5, 23, 24].

При оценке состояния пространства горных выработок в результате ведения тех или иных технологических процессов и при инцидентах в вопросах обеспечения взрывопожаробезопасности необходимо ориентироваться не на величину взрывопожароопасных концентраций метана в РА, а на наличие в РА именно этих веществ.

Изменение взрывопожароопасных свойств прежде всего по взрывопожароопасным показателям – нижнему концентрационному пределу (НКПР) и температуре самовоспламенения в гомологическом ряду алканов показано на **рис. 1**. Графические зависимости, приведенные на рис. 1, получены авторами на основании имеющихся справочных значений показателей пожаровзрывоопасности (специализированные справочники А. Н. Баратова и А. Я. Корольченко «Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения», 1990 и 2004 гг.).

Из рис. 1 следует, что НКПР метана (5,28 %) более чем в три раза выше, чем у веществ, имеющих общую формулу C₅H₁₂ (неопентан, изобутан). Температура самовоспламенения

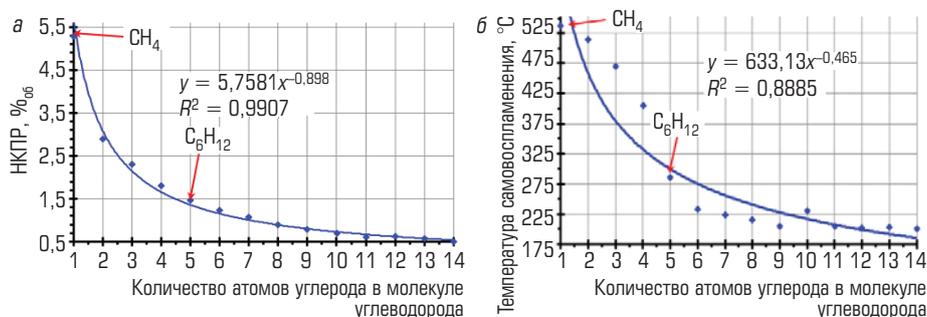


Рис. 1. Зависимости изменения взрывопожароопасных свойств алканов:

a – изменение НКПР от количества атомов углерода в молекуле углеводорода; *б* – изменение температуры самовоспламенения от количества атомов углерода в молекуле углеводорода

ниже более чем на 150 °С. Это послужило еще одним поводом к разработке мультипликативной методики, рассматриваемой в настоящей статье, которая позволит определить НКПР для смеси большого количества взрывопожароопасных газов и паров углеводородов в рудничной атмосфере.

Таким образом, для анализа и идентификации веществ, вероятнее всего выделяющихся из добываемого нефтесодержащего сырья (высоковязкая чистая нефть и/или нефтеводная эмульсия), применили методы хроматографии (ГХ и газожидкостной (ГЖХ)) и МС, а именно метод аналитической хроматографии, совмещенный с методом масс-спектрометрии.

Метод хроматографии выбран неслучайно, его применяют в структурных подразделениях ВГСЧ МЧС РФ для анализа проб рудничного воздуха, он является одним из самых информативных при анализе проб РА. Кроме того, это гибкий комплексный метод, сочетающий в себе возможности выполнения хроматографии, в том числе и в парогазовой фазе, и совместного применения с методом масс-спектрометрии [11, 25–27].

При выполнении хроматографических исследований проб использовали принятые в нормативных документах рекомендации, а также методы исследования, разработанные производителями хроматографического оборудования, в частности ЗАО СКБ «Хроматэк». На отдельных этапах работы исследования проб проводили на хроматографических комплексах серии «Хроматэк-Кристалл», а также установках для проведения хромато-масс-спектрометрии компании Shimadzu [15, 28–30].

В процессе разработки методики исследовали образцы высоковязких нефтей с различных нефтяных месторождений России. Основная часть исследований выполнена применительно к образцам нефти, добываемой термошахтным способом. С учетом требований ПБвНиГП принята максимально возможная температура рудничной атмосферы (80 °С), в которой может находиться человек в штатном и аварийном режиме работы предприятия [17, 31–33]. Поэтому основное внимание уделили веществам, идентифицируемым до этих значительных температур.

При проведении исследований проб регулируемые факторы были определены экспериментальным путем на начальном

этапе разработки мультипликативной методики (методы ГХ МС, ГЖХ МС и др.), что позволяет добиться поставленной цели и способствует решению задач исследования.

Ниже дано описание использованных в научно-исследовательской работе алгоритма и условий проведения анализа образцов высоковязкой нефти.

Идентификацию летучих компонентов нефти выполняли методом ГХ МС на приборе QP 2010 SE (Shimadzu) в варианте распределения компонентов между двумя несмешивающимися фазами (гептан и ацетонитрил).

Предварительно из навески образца объемом 20 мл методом вакуумной перегонки отбирали 1–2 мл конденсата. На разных этапах в качестве образцов выступали: нефть, водонефтяная и нефтеводная эмульсии. Далее микрошприцем для ГХ МС отбирали 30–40 мкл конденсата и растворяли в смеси 1 мл гептана с 1 мл ацетонитрила. После установления межфазного равновесия выполняли ГХ МС-анализ каждой из фаз. Общеизвестно, что алканы, циклоалканы и алкены концентрируются в гептановой фазе, в то время как арены (ароматические углеводороды) и более полярные соединения остаются в ацетонитриле. Применив такой подход, повысили достоверность идентификации, так как разделение общей смеси на две фазы позволяет увеличить достоверность идентификации с 70–80 до 90–98 %. Это считается аналитически достоверным при выполнении обзорных химических анализов аналитическими методами ГХ МС [4, 12, 34].

При проведении анализа в инертной среде в качестве инертного газа выбран газообразный гелий марки А. В распоряжении авторов была колонка компании Restek – RTX 5MS с характеристиками – длина 30 м; внутренний диаметр 0,25 мм; толщина фазы 0,25 мкм. Скорость истечения газа по колонке составляла 1 мл/мин. Деление потока равнялось 10:1, температура испарителя и интерфейса 250 °С. Задали наиболее отвечающую поставленным задачам программу термостата колонки: 50 °С – 4 мин, далее подъем температуры со скоростью 10 °С/мин до величины 250 °С, затем изотерма на 250 °С в течение 10–20 мин. Температура ионного источника 200 °С, ионизация электронным ударом, энергия электронов 70 эВ. Диапазон сканируемых масс 45600 а.е.м., время

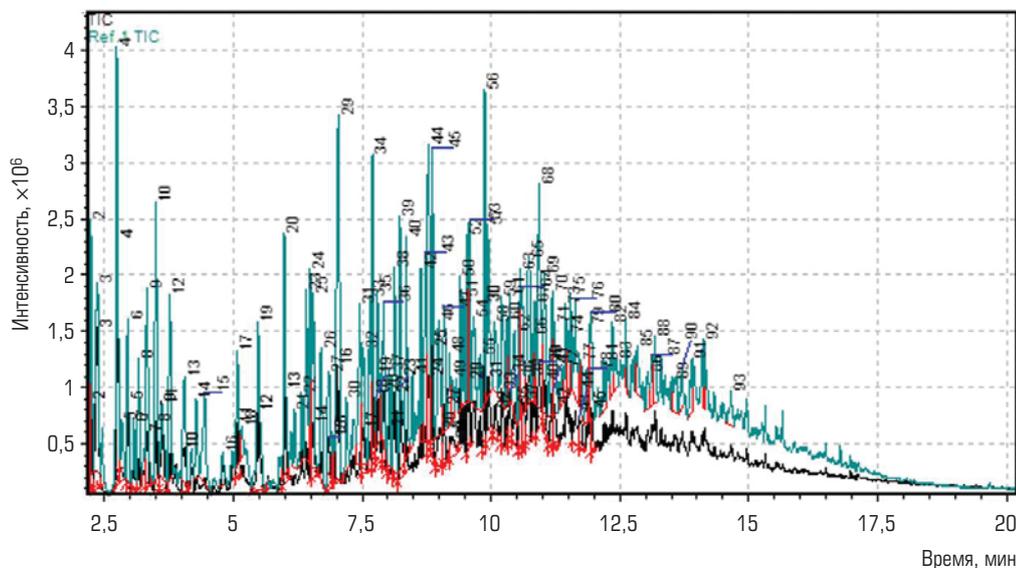


Рис. 2. Хроматограммы по полному ионному току летучей компоненты образцов

сканирования 0,3 с. Время отсечки растворителя составляло не более 2 мин.

Более подробное описание примененных авторами методов и условий проведения экспериментов занимает достаточно большой объем, поэтому в данной статье не приводится. При этом авторы готовы к открытому диалогу и сотрудничеству.

Вспомогательными методами при подготовке проб для анализа были аналитические методы отбора и термостатирования проб нефти. В качестве криоагента использовали жидкий азот.

Результаты и их обсуждение

В результате примененных нестандартного подхода и комплексных научно-исследовательских методов, прежде всего ГХ МС-методов, получены хроматограммы, одна из которых приведена на **рис. 2**.

В результате исследований идентифицированы вещества, которые могут поступить в РА как при ведении технологического процесса при нормальном режиме (80 °С), так и при возникновении нештатных ситуаций, при которых возможно и более высокое повышение температуры РА.

Всего по результатам ГХ МС было идентифицировано более 200 соединений, принадлежащих к различным классам углеводородсодержащих соединений. При этом в некоторых образцах на разных этапах были выявлены кислород, гетеросера и -азот), содержащие химические углеводородные соединения.

В связи с тем, что основное внимание было уделено соединениям с временем выхода менее 10 мин, приводим некоторые данные по этим идентифицируемым соединениям. С учетом большого объема данных по идентифицируемым (определенным) веществам ниже представлены только первые десять соединений, время выхода которых составило менее трех минут:

Время выхода, мин	Соединение
1,231	Neopentane
1,682	Butane, 2 methyl
1,821	Butane, 2,3 dimethyl
1,892	Pentane, 3 methyl
2,217	1 Pentene, 4 methyl
2,250	Pentane, 2,4 dimethyl
2,552	1 Hexene
2,676	1 Hexene, 3,5 dimethyl
2,805	Isopropylcyclobutane
2,878	Cyclopentane, 1,2 dimethyl, trans.

Групповой состав летучих компонентов, которые могут поступить в РА при нормальном режиме работы, представлен алканами линейного строения (n-алканы) и их изомерами. На их долю приходится 70 % легколетучих соединений. Это вещества с температурой кипения менее чем у n-гептана (98 °С). Средняя молекулярная масса соответствует n-алкану C₆H₁₄ и составляет 86 кг/кмоль. Удельная теплота сгорания 45 кДж/кг.

Полученные авторами данные не противоречат результатам других исследователей, занимающихся идентификацией образующих нефть соединений [34–36].

Заключение

На основании полученных экспериментальных данных и требований ПБвНиГП к мониторингу РА и применяемому для этих целей оборудованию аэрогазового контроля, а также требований ФНиП, утвержденных Приказом Ростехнадзора № 520 от 11.12.2020, считаем необходимым дальнейшую работу продолжить в направлении разработки методики построения треугольников взрываемости (по аналогии с угольными шахтами). При этом для нефтяных шахт предусмотреть построение треугольников взрываемости с учетом

идентифицированных в высоковязких нефтях соединений углеводородов C_5-C_6 при нормальном ведении технологического процесса и выше C_6 при возникновении высокотемпературного воздействия на нефть/нефтеводяную эмульсию.

При проведении пробоотбора и анализе отобранных проб следует учитывать вероятность конденсации отдельных компонентов пробы до момента ее анализа. Кроме того, при оценке состояния РА необходимо учитывать вещества, которые могут дополнительно поступить в РА при повышении ее теплофизических параметров до предельных значений. Считаем, что при разработке рекомендаций, направленных на обеспечение аэрологической безопасности, необходимо на начальном этапе установить, какие именно вещества могут поступить в пространство подземных горных выработок, и с учетом этих данных применять датчики контроля концентраций тех или иных веществ, а также определять места их установки. При этом следует помнить, что в результате динамических процессов

по переносу воздушных масс газопаровоздушная смесь может стратифицироваться без учета плотности. Иными словами, в зависимости от удаления от источника образования паров нефтепродуктов и изменения температуры в горной выработке взрывопожароопасная смесь может быть сосредоточена (образоваться) как у почвы, так и у кровли горной выработки. Поэтому считаем, что дальнейшую работу в данном направлении следует продолжить и разработать методику, позволяющую не только оценить взрывоопасность среды (как в случае с треугольниками взрываемости), но и обосновать применение тех или иных систем (датчиков) газового контроля, прежде всего стационарного и коллективного пользования, и определить места их установки.

Библиографический список

См. англ. блок. 

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 9, pp. 35–40
DOI: 10.17580/gzh.2023.09.05

Multiplicative method to assess fire and explosion hazard of mine air containing hydrocarbon gases

Information about authors

V. A. Rodionov¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences, Rodionov_VA@pers.spmi.ru

A. S. Seregin¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

D. A. Ikonnikov¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

The brief statistics on underground mines, accident rate and fatal injury rate is given. From the review of the research data and Rostekhnadzor's reports, it is concluded on the lack of actions aimed at elimination, prevention and/or precaution of incidents and accidents (emergency situations) at underground mining facilities. One of the causes of such emergencies may probably be insufficient attention to the assessment of fire and explosion hazards of substances in composition of mine air. Emphasis is laid on the substances which can enter mine air in case of an incident and/or accident of any type. As an approach to the assessment of fire and explosion hazard of mine air, the authors propose the multiplicative method integrating sampling techniques, special sample preparation and analytical survey of samples. The analytical processes included in the multiplicative method by the authors are the combination of analytical chromatography and mass-spectroscopy. Based on the research, it is recommended to develop an assessment procedure for the fire and explosion hazard of mine air, with regard to a wider spectrum of substances which can enter underground roadways as a result of various processes. It is suggested to use the procedure based on explosion triangle imaging developed for coal mines as a prototype standard.

Keywords: mine air, air, oil mine, analytical chromatography, mass-spectroscopy, fire and explosion hazard, toxic gases, liquid hydrocarbons.

References

1. Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service Annual 2021 Report. Moscow : NTTs PB, 2022. 407 p.
2. Petrenko I. E. Russia's coal industry performance for January–December, 2021. *Ugol*. 2022. No. 3. pp. 9–23.
3. Kabanov E. I. Allowable occupational injury risk assessment in coal mining industry. *GIAB*. 2022. No. 5. pp. 167–180.
4. Kabanov E. I., Korshunov G. I., Rodionov V. A. Expert system based on fuzzy logic for assessment of methane and dust explosion risk in coal mines. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 8. pp. 85–88.

5. Rodionov V. A., Karpov G. N., Leisle A. V. Methodological approach to the need to assess the explosion and fire hazard properties of sulfide-containing polymetallic ores. *GIAB*. 2022. No. 6-1. pp. 198–213.
6. Rodionov V., Tumanov M., Skripnik I., Kaverzneva T., Pshenichnaya C. Analysis of the fractional composition of coal dust and its effect on the explosion hazard of the air in coal mines. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 981, No. 3. 032024. DOI: 10.1088/1755-1315/981/3/032024
7. Abiev Z. A., Rodionov V. A., Paramonov G. P., Chernobay V. I. Method to investigate influence of inhibitory and phlegmatizing agents on ignitability and explosibility of coal dust. *GIAB*. 2018. No. 5. pp. 26–34.
8. Korshunov G. I., Rudakov M. L., Kabanov E. I. The use of a risk-based approach in safety issues of coal mines. *Journal of Environmental Management and Tourism*. 2018. Vol. IX, No. 1(25). pp. 181–186.
9. Kornev A. V., Korshunov G. I., Kudelas D. Reduction of dust in the longwall faces of coal mines: problems and perspective solutions. *Acta Montanistica Slovaca*. 2021. Vol. 26(1). pp. 84–97.
10. Gridina E. B., Kovshov S. V., Borovikov D. O. Hazard mapping as a fundamental element of OSH management systems currently used in the mining sector. *Nauchnyi vestnik Natsionalnogo gornogo universiteta*. 2022. No. 1. pp. 107–115.
11. Vasilets V. N., Afanasev P. I., Pavlovich A. A. Safe operation of mining-and-transport system under impact of seismic shot waves. *GIAB*. 2020. No. 1. pp. 26–35.
12. Fomin S. I., Ivanov V. V., Semenov A. S., Ovsyannikov M. P. Incremental open-pit mining of steeply dipping ore deposits. *ARP Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 15, No. 11. pp. 1306–1311.
13. Klimova I. V., Smirnov Yu. G., Rodionov V. A. Modeling of the interrelations between the working conditions and the health of oil sheds personnel using fuzzy logic. *Bezopasnost truda v promyshlennosti*. 2022. No. 1. pp. 46–50.
14. Semin M. A., Isaevich A. G., Trushkova N. A., Bublik S. A., Kazakov B. P. Calculating dispersion of air pollutants in mines. *Journal of Mining Science*. 2022. Vol. 58, No. 2. pp. 246–256.
15. Kaledina N. O., Malashkina V. A. Indicator assessment of the reliability of mine ventilation and degassing systems functioning. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 250. pp. 553–561.
16. Romanchenko S. B., Naganovskiy Yu. K., Kornev A. V. Innovative ways to control dust and explosion safety of mine workings. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252. pp. 927–936.
17. Skopintseva O. V., Balovtsev S. V. Air quality control in coal mines based on gas monitoring statistics. *GIAB*. 2021. No. 1. pp. 78–89.
18. Balovtsev S. V. Comparative assessment of aerological risks at operating coal mines. *GIAB*. 2021. No. 2-1. pp. 5–17.
19. Khokhlov S. V., Sokolov S. T., Vinogradov Yu. I., Frenkel I. B. Conducting industrial explosions near gas pipelines. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 247. pp. 48–56.

20. Xinchun Li, Xiaolin Zhang, Quanlong Liu, Yueqian Zhang, Xiao Gu et al. Research on coal mine building compliance inspection system based on accident causation and BIM in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2022. Vol. 19, Iss. 24. 16466. DOI: 10.3390/ijerph192416466
21. Zubov V. P., Phuc L. Q. Development of resource-saving technology for excavation of flat-lying coal seams with tight roof rocks (on the example of the Quang Ninh coal basin mines). *Journal of Mining Institute. Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 257. pp. 795–806.
22. Semenov A. S., Kuznetsov V. S. Assessment of level of risk in decision-making in terms of career exploitation. *International Journal of Economics and Financial Issues*. 2015. Vol. 5, No. 3S. Special Issue. pp. 165–172.
23. Gendler S., Prokhorova E. Risk-based methodology for determining priority directions for improving occupational safety in the mining industry of the Arctic Zone. *Resources*. 2021. Vol. 10, Iss. 3. DOI: 10.3390/resources10030020
24. Kalach A. V., Cherepakhin A. M., Kalach E. V. Fire hazard assessment methodology for combustible medium based on substances handling at oil and gas facilities. *Tekhnosfernaya bezopasnost*. 2019. No. 4(25). pp. 57–61.
25. Rowley J. R., Rowley R. L., Wilding W. V. Prediction of pure-component flash points for organic compounds. *Fire and Materials*. 2011. Vol. 35, Iss. 6. pp. 343–351.
26. Nikitina S. I., Kononov M. A., Stepanov Yu. A. Creation of a system of automated monitoring and accounting of roof offsets of underground products. *East European Scientific Journal*. 2020. No. 5-2(57). pp. 55–59.
27. Kazanin O. I., Ilinets A. A. Ensuring the excavation workings stability when developing excavation sites of flat-lying coal seams by three workings. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 253. pp. 41–48.
28. Isaevich A. G., Starikov A. N., Maltsev S. V. Improvement of air sampling method to determine relative concentration of combustion gases in mine air. *GIAB*. 2021. No. 4. pp. 143–153.
29. Maltsev S. V., Chaykovskiy I. I. Oxidation of sulfide ore in complex ore deposits. *Gornoe ekho*. 2022. No. 2(87). pp. 114–118.
30. Farakhutdinova Z. G., Bakhonina E. I., Shutov N. V. Improvement of interaction mechanism between oil refining enterprises and contractors. *Bezopasnost tekhnogenykh i prirodnykh sistem*. 2022. No. 3. pp. 18–23.
31. Mamaev K. V. Application of water steam in the oil and gas industry. Available at: <http://rou.ru/news/item/ispolzovani-vodyanogo-para-v-neftegazovoy-otrasli-5/> (accessed: 15.06.2023).
32. Shafranik Yu. K., Kryukov V. A. Oil in space and “oil space”. *Energeticheskaya politika*. 2018. No. 3. pp. 69–73.
33. Mustafin I. A., Sidorov G. M., Stankevich K. E., Bayram-Ali T. M., Salishev A. I. et al. Hydrocatalytic processes of heavy oil fractions processing with use of perspective nanoscale catalysts. *Fundamentalnye issledovaniya*. 2018. No. 7. pp. 22–28.
34. Kiebaev A. A., Aliev F. A., Mitroshin A. V., Andreev D. V., Vakhin A. V. Heavy oil conversion in the presence of rock-forming mineral components in aqua-thermolysis. *Neftegaz.RU*. 2021. No. 4(112). pp. 24–27.
35. Poletaeva O. Yu., Leontev A. Yu. Heavy, ultra-viscous, bituminous, metal-bearing oils and oil-bearing sandstones. *NefteGazokhimiya*. 2019. No. 1. pp. 19–24.
36. Pisarev D. I. Classical and modern methods of mass-spectrometry. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Meditsina. Farmatsiya*. 2012. No. 10-2(129). pp. 5–11.

