

РАСЧЕТНО-ПРОГНОЗНАЯ МОДЕЛЬ НАКОПЛЕНИЯ ВЗРЫВОПОЖАРООПАСНЫХ ГАЗОВ В РУДНИЧНОЙ АТМОСФЕРЕ НЕФТЯНЫХ ШАХТ

В.В. Мяков¹, Г.И. Коршунов¹, Е.И. Кабанов¹, В.А. Родионов¹

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия, e-mail: s215061@stud.spmi.ru

Аннотация: Приведена характеристика условий труда на нефтяных шахтах, разрабатывающих месторождения высоковязкой нефти, идентифицированы профессиональные риски, связанные с взрывами газопаровоздушных смесей в подземных выработках. Актуальность и цель исследования сформулированы и обоснованы на основе результатов анализа нормативно-правовых актов, научно-технической документации, применяемой в нефте- и горнодобывающих отраслях промышленности, а также других источников информации, в которых рассматриваются вопросы нефтедобычи шахтным способом. Основная цель научного исследования заключается в разработке методологического подхода к прогнозированию взрывоопасного состояния рудничной атмосферы нефтяных шахт, а также определении режимов эксплуатации выработок, при которых возникают условия для формирования взрывоопасной рудничной атмосферы. Одной из составляющих методологии исследования является предлагаемый авторами метод математического моделирования процесса разбавления свежим воздухом взрывоопасных химических веществ. На основе полученных экспериментальных данных авторами предложен алгоритм оценки взрывоопасного состояния рудничной атмосферы выработок нефтяных шахт. Алгоритм основан на методе расчета прогнозных значений концентрации взрывоопасных химических веществ в рудничной атмосфере. Установлено влияние содержания физически связанной воды в нефтяных эмульсиях на значение нижнего температурного предела распространения пламени. Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о способности высоковязких нефтей формировать взрывоопасные газопаровоздушные смеси в результате их нагрева в условиях рудничного пожара. В заключение приведены основные выводы и рекомендации по использованию результатов исследования в рамках управления профессиональными рисками, связанными с взрывами газопаровоздушных смесей в выработках нефтяных шахт.

Ключевые слова: нефтяная шахта, добыча вязкой нефти, промышленная безопасность, охрана труда, оценка профессиональных рисков, рудничная атмосфера, прогноз взрывоопасности, пожаровзрывоопасность нефтепродуктов, нефтяные эмульсии.

Для цитирования: Мяков В. В., Коршунов Г. И., Кабанов Е. И., Родионов В. А. Расчетно-прогнозная модель накопления взрывопожароопасных газов в рудничной атмосфере нефтяных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2024. – № 10. – С. 136–151. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_136.

Prediction and analysis model of explosive and inflammable gas accumulation in air in oil mines

V.V. Myakov¹, G.I. Korshunov¹, E.I. Kabanov¹, V.A. Rodionov¹

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,
Saint-Petersburg, Russia, e-mail: s215061@stud.spmi.ru

Abstract: The working conditions in mines in viscous oil fields are characterized, and the risks related with underground explosions of steam and gas/air mixtures are identified. The relevance and the objective of the research are formulated and substantiated on the basis of the review of legal, scientific and technical documentation in use in oil recovery and in other mining industries, as well as the other information sources that address the issues of underground oil recovery. The goal of the research is to develop a methodological approach to the explosion hazard prediction in oil mine air, and to determine the operational conditions predisposed to origination of an explosion hazard in mine air. One of the components of the research procedure is a method proposed by the authors, which consists in mathematical modeling of dilution of explosive chemical agents with fresh air. From the experimental evidence, the authors put forward an algorithm for estimating explosive hazard of air in oil mines. The algorithm uses the method of predictive calculation of explosive chemical agent concentrations in mine air. The influence of physically bound water content in oil emulsions on the lower value of the flame spread temperature range is determined. The experimental results prove the ability of high viscous oil to generate explosive steam and gas/air mixtures as a result of heating under conditions of underground fires. Finally, the article gives the conclusions and recommendations on using the research findings in management of professional risks associated with explosions of steam and gas/air mixtures in oil mines.

Key words: oil mine, viscous oil recovery, industrial safety, occupational safety, professional risk assessment, mine air, explosion hazard prediction, explosion/fire hazard of oil products, oil emulsions.

For citation: Myakov V. V., Korshunov G. I., Kabanov E. I., Rodionov V. A. Prediction and analysis model of explosive and inflammable gas accumulation in air in oil mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2024;(10):136-151. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2024_10_0_136.

Введение

Технология добычи нефти шахтным способом сочетает в себе как особенности, характерные для подземной разработки месторождений, так и черты, свойственные традиционному способу нефтедобычи. Подобное сочетание технологических решений характеризуется специфическим набором опасных и вредных производственных факторов, формирующих уникальные условия труда.

В настоящее время известен ряд исследований, посвященных анализу ус-

ловий труда на нефтешахтах России и подробно раскрывающих особенности влияния на горнорабочих шума и вибрации [1], нагревающего микроклимата [2–4], химического фактора [5], тяжести и напряженности труда [6], а также рассматривающих вопросы синергетического влияния указанных вредностей [7]. В работе [8] исследуются профессиональные риски, связанные с воздействием на персонал нефтешахт ряда опасных производственных факторов, приводящих к возникновению травматизма

в результате прорывов пара в горные выработки, обрушений горных выработок и подземных пожаров. Стоит отметить, что в отношении указанных производственных факторов могут быть использованы уже существующие средства защиты, нашедшие широкое применение в горно- и нефтедобывающей промышленности.

Анализ статистики аварийности на нефтяных шахтах России позволяет идентифицировать профессиональные риски, связанные с опасностью травмирования в результате взрывов газопаровоздушных смесей (ГПС) в подземных выработках. Так, например, в 2020 г. в процессе ликвидации пожара на НШ № 3 предприятия НШПП «Яреганефть» в подземных выработках произошел взрыв газовоздушной смеси [9].

Проблема возникновения подземных взрывов при шахтной разработке месторождений легких нефтей описана в ряде литературных источников и более подробно изложена в работе [10]. Выявленная по результатам литературного обзора проблема доказывает наличие опасности возникновения взрывов в выработках нефтешахт, ведущих добычу тяжелых высоковязких нефтей термощахтным способом.

Анализ научно-технических и других источников показывает, что в настоящий момент данная опасность мало изучена: отсутствуют наработки, позволяющие выполнять как анализ взрывоопасного состояния атмосферы выработок нефтяных шахт, так и обоснование соответствующих защитных мероприятий. Существующий пробел в нормативно-правовой и научно-методической базе не позволяет выполнять прогнозирование опасных зон при взрывах, что затрудняет разработку необходимых мер по защите горнорабочих и горноспасателей от взрывов в подземных выработках нефтешахт. Стоит отметить, что

существующая на данный момент проблема имеет предпосылки к обострению в ближайшем будущем. Так, в соответствии с некоторыми оценками [10, 11], отработка месторождений легкой нефти неминуемо приведет к увеличению объемов добычи высоковязких нефтей с использованием термощахтной технологии. По мнению других авторов [12], более высокие по сравнению с традиционными способами добычи нефти значения коэффициента извлечения сделают актуальным использование термощахтной технологии для повторной разработки ранее отработанных месторождений. Считаем, что эти обстоятельства приведут к росту числа эксплуатируемых в России нефтешахт, что, с одной стороны, может привести к увеличению числа аварий, связанных с пожарами и взрывами на нефтешахтах, а с другой стороны — к значительному росту числа работников, находящихся под воздействием рассматриваемых опасных производственных факторов.

Приведенные обстоятельства формируют актуальность настоящего исследования, целью которого является разработка и обоснование методологического подхода, позволяющего осуществлять прогноз взрывоопасного состояния рудничной атмосферы в выработках нефтяных шахт, а также определение таких условий их эксплуатации, при которых образуются предпосылки к возникновению взрывов ГПС.

Методология

Технология шахтной разработки нефтяных месторождений подразумевает извлечение нефти из недр с помощью скважин, которые пробуриваются из подземных горных выработок, сбор и транспортировку нефти по выработкам, выдачу нефти на поверхность с помощью насосов. В подобных условиях источником поступления взрывоопасных хи-

мических соединений в рудничную атмосферу является обращаемая в выработках нефть, что делает необходимым в рамках прогноза взрывоопасного состояния рудничной атмосферы выполнение анализа пожаровзрывоопасных свойств самих нефтепродуктов и учет влияния рудничной вентиляции.

Вопросы оценки свойств нефтепродуктов в части их способности формировать при испарении взрывоопасные парогазовоздушные смеси подробно рассмотрены в работах, посвященных обеспечению пожаровзрывобезопасности объектов добычи и транспортировки [13, 14], а также хранения нефтепродуктов [15–17]. В частности, в репрезентативных исследованиях [18–20] указывается, что в технологических резервуарах и емкостях, магистралях и регулирующей аппаратуре над зеркалом нефтепродукта всегда присутствуют примеси углеводородных фракций. При этом их концентрация непосредственно зависит от состава нефтепродукта и его температуры. В определенных условиях она может достигать взрывоопасных значений. Для оценки взрывоопасности образующихся при этом ГПС авторами предложены методы модельного экспериментального исследования технологических процессов, основанные, в том числе, и на проведении теста на зажигание смесей при моделировании различных режимов работы оборудования. Так, например, в работе [21], посвященной анализу опасности возникновения взрывов в вертикальных резервуарах, предлагается выполнять оценку горючести ГПС на основе температурных пределов распространения пламени для насыщенных смесей и на основе концентрационных пределов распространения пламени для ненасыщенных смесей.

В части анализа процессов формирования взрывоопасных смесей в рудничной атмосфере к настоящему моменту

накоплена внушительная база научных знаний, основной объем которых посвящен проблемам образования взрывоопасных газозвушных [22–24] и пылевоздушных [25, 26] смесей в горных выработках метанообильных угольных шахт. Так, в работах [27–29] указывается, что в основе анализа способов обеспечения взрывобезопасности выработок угольных шахт лежит прогноз величин концентраций опасных газов в воздухе, который должен учитывать процессы газовыделения, разбавления опасных газов и перераспределения их потоков за счет средств рудничной вентиляции. При этом авторами исследований [30–32] указывается, что взрывоопасность горных выработок определяется эффективностью всей системы управления газовыделением, которая зависит от геологических и горнотехнических условий, учет которых должен осуществляться по отдельности для каждого участка сети горных выработок [33, 34].

Проведенный анализ исследований в смежных областях показал, что задача прогноза взрывоопасного состояния рудничной атмосферы в выработках нефтяных шахт должна решаться с использованием метода математического моделирования процесса разбавления свежим воздухом взрывоопасных ГПС. При этом подразумевается, что они могут поступать как из внутренних слоев, так и с открытой поверхности нефтепродукта. В результате применения такого подхода получаем в качестве конечного результата расчетные значения концентрации горючих химических веществ в рудничной атмосфере и сопоставляем с величиной нижнего концентрационного предела распространения пламени (НКПР) для такого рода смесей и/или индивидуального вещества.

В качестве исходных данных для составления прогноза взрывоопасности рудничной атмосферы при моделирова-

нии учитывали расход подаваемого на проветривание воздуха, а также интенсивность процесса поступления пожаровзрывоопасных компонентов из нефтепродукта.

В результате применения термошахтной технологии добычи нефти в горные выработки поступают водонефтяные и нефтеводные эмульсии.

Содержание воды в такого рода эмульсиях может изменяться в широких пределах. С учетом вышеизложенного авторы считают, что при определении интенсивности испарения легких и тяжелых углеводородов из эмульсий в обязательном порядке должна учитываться способность нефтепродуктов с различным содержанием физически связанной воды формировать при нагреве эмульсий взрывоопасные парогазовоздушные смеси.

Авторы считают, что решение данной задачи может быть достигнуто при использовании стандартных методов оценки пожаровзрывоопасных свойств такого рода эмульсий и применении на том или ином этапе методов газожидкостной хроматографии. При этом особое внимание нужно уделить влиянию физически связанной воды на изменение температурных пределов распространения пламени по паровоздушным смесям [35], образующимся при нагревании исследуемых образцов. В качестве образцов для исследования использовались различные соотношения высоковязкой нефти и воды.

Таким образом, предлагаемый авторами методологический подход к прогнозу взрывоопасности рудничной атмосферы, который может быть реализован в дальнейшем в виде конкретной математической модели, позволит производить прогноз взрывоопасного состояния рудничной атмосферы в выработках нефтяных шахт, как с учетом вариативности условий, создаваемых при различ-

ных режимах эксплуатации отдельных участков подземных выработок, так и в зависимости от эмпирических данных, описывающих пожаровзрывоопасные свойства обращающихся нефтепродуктов.

Результаты

В основу разрабатываемой модели положено уравнение материального баланса, отображающего процесс накопления пожаровзрывоопасных веществ (далее ПВВ) в рудничной атмосфере в соответствии со схемой, указанной на рис. 1. Поступление ПВВ в пространство горной выработки за счет испарения тех или иных компонентов нефтяной эмульсии (далее нефтепродукт) приводит к их накоплению в атмосфере выработки. Это выражается в изменении концентрации ПВВ в объеме выработки в начале и конце интервала времени Δt . С учетом вытеснения находящейся в объеме выработки ГПС свежим воздухом и парами нефтепродукта указанный выше процесс может быть описан следующим равенством:

$$\begin{aligned} V_{гор}(\tau_k) - V_{гор}(\tau_n) = \\ = V_{гор}^+(\Delta t) - V_{гор}^-(\Delta t) \end{aligned} \quad (1)$$

где $V_{гор}(\tau_n)$, $V_{гор}(\tau_k)$ — объем горючих паров, содержащийся в горной выработке в начале и в конце интервала времени Δt соответственно, m^3 ; $V_{гор}^+(\Delta t)$ — объем ПВВ, поступивших за счет процесса испарения в выработку за интервал времени Δt , m^3 ; $V_{гор}^-(\Delta t)$ — объем ПВВ, вытесненных из выработки за интервал времени Δt , m^3 .

При условии, что процесс формирования ГПС происходит в заполняемом объеме участка выработки $V_{выр}$, равенство (1) в результате преобразования принимает вид следующего уравнения, которое позволяет производить расчет концентрации ПВВ в ГПС в конце периода времени Δt :

$$\varphi_{гор}(\tau_k) = \varphi_{гор}(\tau_n) + \frac{V_{гор}^+(\Delta\tau) - V_{гор}^-(\Delta\tau)}{V_{выр}} \quad (2)$$

где $\varphi_{гор}(\tau_k)$ – концентрация ПВВ в объеме выработки в конце интервала времени $\Delta\tau$, доля; $\varphi_{гор}(\tau_n)$ – концентрация ПВВ в объеме выработки в начале интервала времени $\Delta\tau$, доля; $V_{выр}$ – заполняемый объем участка выработки, содержащего нефтепродукт, м³.

Объем ПВВ, поступивших в пространство участка выработки за интервал времени $\Delta\tau$, определяется на основе величины объемной скорости испарения горючих компонентов нефтепродукта с учетом площади открытых поверхностей испарения и продолжительности процесса испарения:

$$V_{гор}^+(\Delta\tau) = 10^{-6} \cdot W_{гор} \cdot S \cdot \Delta\tau, \quad (3)$$

где $W_{гор}$ – объемная скорость испарения горючих компонентов нефтепродукта с единицы площади, мл/(м²·с); S – площадь поверхности нефтепродукта, из которой происходит испарение, м²; $\Delta\tau$ – продолжительность интервала процесса испарения, с.

Объем горючих паров, содержащихся в ГПС, вытесненной из пространства

участка выработки за интервал времени $\Delta\tau$, принимается равным произведению концентрации горючих паров в выработке в начале интервала времени $\Delta\tau$ и суммы объемов горючих паров и чистого воздуха, поступивших в выработку за интервал времени $\Delta\tau$:

$$V_{гор}^-(\Delta\tau) = (V_{гор}^+(\Delta\tau) + Q_{факт}) \cdot \varphi_{гор}(\tau_n) \quad (4)$$

где $Q_{факт}$ – расход свежего воздуха, м³/с. Ввиду нестационарного характера процесса формирования ГПС уравнение (2) следует решать итеративным путем при фиксированном интервале времени $\Delta\tau$. При условии $\Delta\tau = 1$ с и с учетом выражений (3) и (4) равенство (2) принимает следующий вид:

$$\varphi_{гор}(\tau_k) = \frac{10^{-6} \cdot W_{гор} \cdot S \cdot (1 - \varphi_{гор}(\tau_n)) - Q_{факт} \cdot \varphi_{гор}(\tau_n)}{V_{выр}} + \varphi_{гор}(\tau_n) \quad (5)$$

При последовательном решении уравнения (5) величину $\varphi_{гор}(\tau_n)$ следует принимать:

- для начального момента времени $\tau = 0$ – равной нулю;

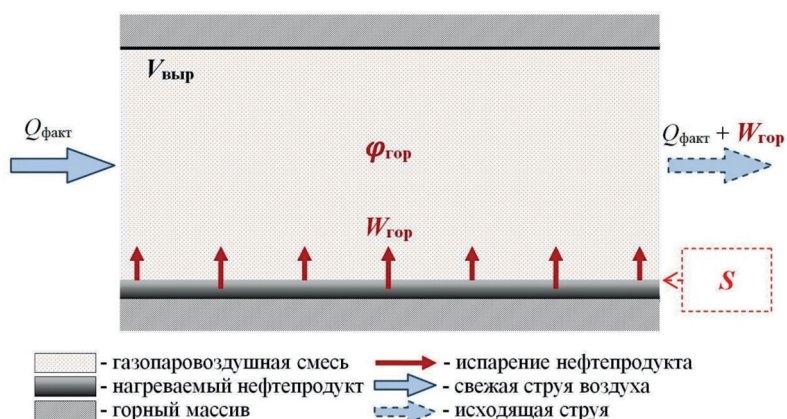


Рис. 1. Схема процесса формирования ГПС в рудничной атмосфере подземной выработки

Fig. 1. Scheme of the process of vapour-gas-air mixture formation in the mine atmosphere of an underground mine working (compiled by the authors)

- для последующих i -х моментов времени — равной концентрации горючих паров, содержащихся в объеме горной выработки в конце предыдущего ($i-1$) момента времени.

В связи с тем, что величины расхода свежего воздуха ($Q_{\text{факт}}$), заполняемого объема участка выработки ($V_{\text{выр}}$) и площади поверхности испарения нефтепродукта (S) могут быть установлены исходя из фактических условий эксплуатации выработки, ключевой задачей в рамках прогноза концентрации испаряемых из нефтепродукта в рудничную атмосферу ПВВ является определение объемной скорости испарения компонентов нефтепродукта $v_{\text{гор}}$. Определение указанной величины для образцов нефтепродукта с различным содержанием физически связанной воды выполнено на основе результатов экспериментального определения температурных пределов распространения пламени по газопаровоздушным смесям [36].

Для приготовления исследуемых образцов нефтепродукта была использована предварительно отделенная в производственных условиях, согласно технологическому процессу, от физически связанной воды проба высоковязкой нефти с одного из месторождений России, извлеченная из недр методом парогравитационного дренажа. К обезвоженной пробе с помощью мерного шприца добавлялось требуемое по условиям эксперимента то или иное количество воды (ГОСТ Р 51232-98) с последующей гомогенизацией пробы.

Содержание воды в образцах для исследования необходимых свойств определялось экспериментальным путем. В итоге для дальнейшей работы использовали нефтяные эмульсии с содержанием воды 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50% и 60%.

На основании полученных экспериментальных данных авторами были ус-

тановлены значения нижнего температурного предела распространения пламени (НТПР), приведенные в таблице.

Полученные данные позволяют в первом приближении определить для каждого i -го образца среднюю (по интервалу температур нагрева ($T_{\text{нагр}}$) от 20 °С до температуры, равной нижнему температурному пределу распространения пламени ($T_{\text{нагр}} = 20 \div \text{НТПР}_i$, °С)) объемную скорость испарения горючих компонентов нефтепродукта с единичной площади $W_{\text{гор}}$ в соответствии с формулой, результаты применения которой приведены в таблице:

$$W_{\text{гор}} = \frac{V_{\text{PC}} \cdot \Phi_{\text{НКПР}}}{S \cdot \tau_{\text{НКПР}}}, \quad (6)$$

где V_{PC} — объем реакционного сосуда, мл; $\Phi_{\text{НКПР}}$ — нижний концентрационный предел распространения пламени газопаровоздушной смеси, образующейся при нагревании исследуемого образца до температуры $T_{\text{нагр}} = \text{НТПР}$, доля (для исследованных образцов определяется по методике, изложенной в работе «Изучение воздушной среды в горных выработках нефтешахт Ярегского нефтетитанового месторождения», выполненной под руководством проф. С.Г. Гендлера); S — площадь поверхности образца нефтепродукта, с которой происходит испарение, м²; $\tau_{\text{НКПР}}$ — время достижения НКПР (принимается продолжительность периода нагревания образца до $T_{\text{нагр}} = \text{НТПР}$, определялось экспериментально авторами статьи), с.

Обсуждение результатов

В результате выполнения научно-исследовательской работы установлено, что способность нефтепродуктов образовывать при испарении взрывоопасные ГПС существенно зависит от содержания в них физически связанной воды. Экспериментальные данные, часть из которых представлена в таблице, и ре-

Значения НТПР для исследованных образцов нефтепродукта (составлено авторами)
Values of Lower Temperature Limit of Flame Propagation values
for the tested petroleum product samples (compiled by the authors)

| Содержание физически связанной воды $\varphi_{\text{ФСВ}}$, % | Нижний температурный предел распространения пламени НТПР, °С | Объемная скорость испарения компонентов нефтепродукта с единичной площади $W_{\text{гор}}$, мл/(м ² · с) |
|--|--|--|
| 0 | 235 | 15,7 |
| 10 | 250 | 14,0 |
| 20 | 270 | 13,1 |
| 30 | 290 | 12,4 |
| 40 | 300 | 12,2 |
| 50 | 315 | 11,6 |
| 60 | — | — |

зультаты их обработки доказывают способность образуемых при термошахтной добыче вязкой нефти нефтяных эмульсий формировать взрывоопасные парогазовоздушные смеси в интервале содержания физически связанной воды $0 \leq \varphi_{\text{ФСВ}} \leq 50\%$. При испытании образца с содержанием физически связанной воды $\varphi_{\text{ФСВ}} = 60\%$ были получены отрицательные результаты теста на воспламенение. Это позволяет сделать вывод об отсутствии способности нефтяных эмульсий высоковязких нефтей с содержанием физически связанной воды $\varphi_{\text{ФСВ}} \geq 60\%$ образовывать взрывоопасные ГПС при нагревании в исследованном интервале температур $20 \leq T_{\text{нагр}} \leq 380$ °С.

Полученные значения нижнего температурного предела распространения пламени свидетельствуют о том, что образование взрывоопасной ГПС может происходить при значениях температур нагрева $T_{\text{нагр}} \geq 235$ °С, достижение которых невозможно в штатных режимах эксплуатации горных выработок. Из этого следует, что формирование взрывоопасных ГПС в выработках нефтяных шахт, разрабатывающих месторождения высоковязких нефтей, может происходить при нарушении технологии добычи, в результате которого происхо-

дит разогрев нефтепродукта и т.д., а также в условиях развития рудничного пожара, что подтверждается случаем взрыва при ликвидации пожара на НШ № 3 НШПП «Яреганефть» в 2020 г.

Из данных таблицы следует, что величины объемной скорости испарения горючих компонентов снижаются по мере увеличения содержания в нефтепродукте физически связанной воды, что может быть обосновано снижением содержания в нефтепродукте пожаровзрывоопасных компонентов и ростом интенсивности образования водяного пара.

Полученные значения $W_{\text{гор}}$ могут быть использованы при прогнозе и оценке взрывоопасности рудничной атмосферы, связанной с ростом концентрации горючих химических соединений в ГПС, образуемых в результате нагрева нефтепродукта. Так, в ходе верификации предложенной расчетно-прогнозной модели с учетом полученных значений $W_{\text{гор}}$ произведено итеративное решение уравнения (5), что позволило получить зависимости концентрации горючих паров нефтепродукта в выработке от продолжительности процесса испарения. Пример получаемых зависимостей для нефтепродуктов с различным содержанием физически связанной воды представлен на рис. 2 (при $Q_{\text{факт}}, V_{\text{выр}}, S = \text{const}$).

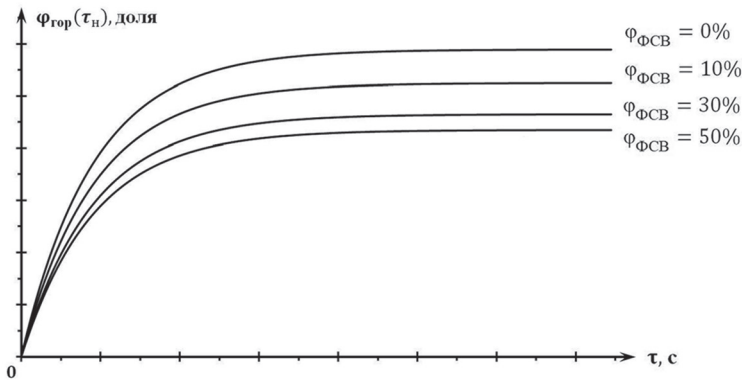


Рис. 2. Зависимость концентрации горючих паров нефтепродукта в атмосфере выработки от продолжительности процесса испарения нефтяных эмульсий с различным содержанием физически связанной воды W (рисунок составлен авторами)

Fig. 2. Relation between the concentration of flammable vapours of petroleum product in the mine atmosphere and the duration of the evaporation process of oil emulsions with different content of physically bound water W (compiled by the authors)

Представленные на рис. 2 зависимости описывают процесс накопления горючих химических соединений в атмосфере горной выработки и позволяют выполнять прогноз концентрации горючих химических соединений в образующихся ГПС для различных моментов времени τ . Считаем, что разрабатываемая расчетная модель позволит решать ряд важных прикладных задач. При этом сравнение определенных экспериментальным способом прогнозных значе-

ний концентрации горючих химических соединений в ГПС с известными (справочными) значениями нижнего концентрационного предела распространения пламени позволит определять взрывоопасность данной смеси по условию $\Phi_{\text{гор}}(\tau_n) \leq \Phi_{\text{НКПР}}$. Кроме того, выполнение указанного условия позволяет определить время $\tau_{\text{НКПР}}$ необходимое для формирования взрывоопасной смеси в соответствии с графическим способом, представленным на рис. 3.

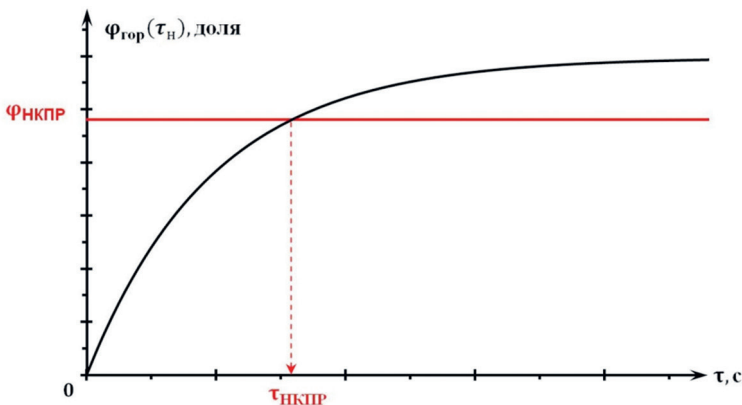


Рис. 3. Визуализированный метод графического определения времени накопления взрывоопасной концентрации горючих паров нефтепродукта в атмосфере выработки (рисунок составлен авторами)

Fig. 3. Visualised method for graphical determination of the time of accumulation of explosive concentration of flammable vapours of petroleum product in the atmosphere of excavation (compiled by the authors)

Авторы считают, что описываемая в статье разрабатываемая авторским коллективом расчетная прогнозная модель несомненно будет обладать практической ценностью при обосновании мероприятий, направленных на повышение взрывобезопасности выработок нефтяных шахт. Данное предположение сделано на основе комплексного анализа влияния интенсивности проветривания на концентрацию взрывоопасных химических веществ в атмосфере выработки, которое в свою очередь позволит решить задачу определения значения расхода воздуха $Q_{тр}$, необходимого для разбавления концентрации горючих паров нефтепродукта $\varphi_{гор}$ до взрывобезопасных значений, а именно до уровней $\varphi_{гор} < \varphi_{НКПР}$ в соответствии с выражением

$$Q_{тр} > \frac{10^{-6} \cdot v_{гор} \cdot S}{\varphi_{НКПР}} . \quad (7)$$

На рис. 4 наглядно показан процесс накопления взрывоопасной концентрации компонентов нефтепродукта в атмосфере выработки при различных условиях ее проветривания. В случае, если фактическое значение расхода воздуха

$Q_{факт}$, м³/с превышает значение $Q_{тр}$, то в выработку поступает количество воздуха, достаточное для разбавления концентрации поступающих от нагреваемого нефтепродукта горючих паров $\varphi_{гор}$ до взрывобезопасных значений. При этом не создаются условия для роста концентрации горючих паров выше значения $\varphi_{НКПР}$ и образование взрывоопасной атмосферы в выработке не происходит. В противном случае, при $Q_{факт} < Q_{тр}$, поступающего воздуха недостаточно для разбавления смеси горючих паров до взрывобезопасных значений, что в конечном итоге приводит к росту их концентрации в рудничной атмосфере до уровня $\varphi_{НКПР}$ и выше ($\varphi_{гор} \leq \varphi_{НКПР}$).

В соответствии с визуализированными на рис. 4 экспериментальными научно-исследовательскими данными можно сделать вывод о том, что предложенная авторами модель позволяет решить задачу прогнозирования концентрации в рудничной атмосфере взрывоопасных компонентов, образующихся при ведении технологического процесса нефтедобычи термошахтным способом, с учетом параметров процесса их испарения из

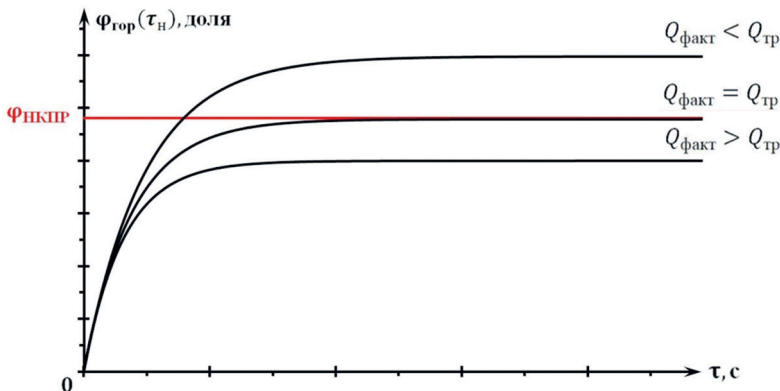


Рис. 4. График изменения концентрации горючих паров нефтепродукта в атмосфере выработки в зависимости от продолжительности процесса испарения для различных условий проветривания (для различных соотношений $Q_{факт} / Q_{тр}$) (рисунок составлен авторами)

Fig. 4. Graph of change in the concentration of flammable vapours of petroleum product in the mine atmosphere depending on the duration of the evaporation process for different ventilation conditions (compiled by the authors)

нефтепродукта и интенсивности рудничной вентиляции.

Вместе с тем выходные данные модели могут быть использованы при проведении исследований, направленных на оценку рисков взрывов и реализацию современных положений концепции риск-ориентированного подхода [37, 38] в целях повышения уровней охраны труда и промышленной безопасности на нефтяных шахтах.

Заключение

На основании полученных авторами экспериментальных научно-исследовательских данных, связанных с разработкой методологического подхода к прогнозу возникновения взрывопожароопасной среды в рудничной атмосфере и оценке времени наступления опасных факторов производственного процесса добычи термошахтным способом высоковязких нефтей, доказана вероятность образования взрывопожароопасных компонентов нефти при ее добыче. Определены граничные условия, при которых не исключается процесс образования в рудничной атмосфере горных выработок такого рода взрывопожароопасных смесей. Установлено, что наибольшую опасность применительно к рассматриваемым в статье случаям представляют нефтяные эмульсии с содержанием воды менее 50 %, а также чрезвычайные ситуации (например, пожар/взрыв), при которых возможен разогрев добытой нефтяной эмульсии до температуры более 235 °С. Таким образом, показана возможность возникновения взрывов в

выработках нефтешахт в условиях развития рудничного пожара.

Авторы считают, что рассмотренная в статье расчетная прогнозная модель позволяет изучать процесс накопления в рудничной атмосфере горной выработки пожаровзрывоопасных веществ и осуществлять прогноз динамики изменения концентрации пожаровзрывоопасных компонентов нефтепродукта в образующихся в рудничной атмосфере парогазовоздушных смесях с учетом расчетных значений объемной скорости их испарения и интенсивности рудничной вентиляции. Кроме того, установлено, что применение модели прогноза изменения концентрации горючих химических соединений в рудничной атмосфере позволило выработать подходы к определению величин расхода воздуха, требуемого для снижения их концентрации до взрывопожаробезопасных значений, а также анализу продолжительности периода загазирования рудничного воздуха в условиях недостаточного проветривания.

Полученные результаты свидетельствуют о достижении поставленных целей и задач исследования и обладают практической значимостью, которая заключается в создании методических основ, позволяющих выполнять прогноз взрывоопасности рудничной атмосферы нефтяных шахт и обосновывать мероприятия по управлению условиями формирования взрывоопасных парогазовоздушных смесей в целях защиты подземного персонала и членов горноспасательных формирований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фомин А. И., Грунско́й Т. В. Методические рекомендации по оценке риска развития профессиональных заболеваний у подземного персонала при термошахтном способе добычи высоковязкой нефти // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2019. — № 1. — С. 82–89. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.18.99.008.

2. Alabyev V. R., Kruk M. N., Bazhina T. P., Semenov A. S., Demin V. I. Economic efficiency of the application of artificial air cooling for normalization of thermal conditions in oil mines // Scientia Iranika. 2020, vol. 27, no. 3, pp. 1606–1615. DOI: 10.24200/SCI.2018.50549.1753.

3. Галкин А. Ф., Курта И. В., Панков В. Ю., Ильинов М. Д. Влияние нефтяного потока на точность прогноза температуры воздуха в горных выработках // Нефтяное хозяйство. — 2020. — № 4. — С. 98—100. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-4-98—100.
4. Обашин А. Н., Рудаков М. Л., Степанов И. С. Оценка профессионального риска, обусловленного нагревающим микроклиматом, в горных выработках нефтяных шахт Ярегского месторождения // Безопасность труда в промышленности. — 2018. — № 7. — С. 67—73. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-7-67-73.
5. Фомин А. И., Жуйков А. Е., Грунско́й Т. В. Исследование результатов медицинских осмотров для оценки риска развития профессиональных заболеваний у работников, задействованных в условиях термошахтной добычи нефти // Вестник Научного центра ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности. — 2021. — № 4. — С. 58—66. DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.20.11.006.
6. Грунско́й Т. В., Каплина М. В., Сохонд Г. В. Оценка тяжести и напряженности труда на рабочих местах подземного персонала Ярегских нефтешахт // Ресурсы Европейского Севера. Технологии и экономика освоения. — 2017. — № 3. — С. 35—55.
7. Фомин А. И., Нор Е. В., Грунско́й Т. В. Учет синергетических эффектов при оценке профессионального риска в нефтяных шахтах // Безопасность труда в промышленности. — 2021. — № 9. — С. 89—94. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-89-94.
8. Мяков В. В., Коршунов Г. И., Кабанов Е. И. Анализ условий труда работников, занятых при термошахтной добыче высоковязкой нефти // XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс. — 2023. — Т. 12. — № 4(64). — С. 222—228.
9. Седнев Д. Реконструкция нефтяных шахт № 1, 2 и 3. Взаимосвязь смертельных случаев на производстве и качества выполнения проектной документации. Анализ ошибок // Горное эхо. — 2021. — № 1 (82). — С. 139—142. DOI: 10.7242/echo.2021.1.25.
10. Коноплев Ю. П., Демченко А. Г., Демченко А. А. Нефтяная шахта — технология, позволяющая обеспечить половину добычи нефти в XXI в. на открытых и отработанных месторождениях России // Недропользование XXI век. — 2020. — № 1(83). — С. 46—55.
11. Nguyen M. T., Nguyen D. L. T., Xia C., Nguyen T. B., Shokouhimehr M., Sana S. S., Grace A. N., Aghbashlo M., Tabatabaei M., Sonne C., Kim S. Y., Lam S. S., Le Q. V. Recent advances in asphaltene transformation in heavy oil hydroprocessing: Progress, challenges, and future perspectives // Fuel Processing Technology. 2021, vol. 213, article 106681. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106681.
12. Воробьёв А. Е., Джими́ева Р. Б. Инновационные технологии разработки месторождений горючего сланца и высоковязкой нефти шахтным способом // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. — 2009. — № 3. — С. 5—16.
13. Сытник С. С., Маринин С. Ю. Результаты исследования состояния пожарной безопасности на нефтеперерабатывающих объектах // Научные труды КубГТУ. — 2019. — № 7. — С. 370—386.
14. Ходжаева Г. К. Оценка риска аварийности нефтепроводных систем в аспекте геодинамических процессов: Монография. — Нижневартовск: Изд-во Нижневарт. гос. ун-та, 2016. — 132 с.
15. Дупляков Г. С., Елфимова М. В., Пешков А. В. Анализ протекания аварии, сопровождаемой возникновением пожара и взрыва, на складах нефти и нефтепродуктов // Сибирский пожарно-спасательный вестник. — 2020. — № 1(16). — С. 42—47.
16. Назаров В. П., Корольченко Д. А., Швырков С. А., Тангиев М. М., Петров А. П. Особенности оценки уровня пожаровзрывобезопасности резервуаров перед проведением огневых работ // Пожаровзрывобезопасность. — 2021. — № 6. — С. 52—60. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.52-60.
17. Пшенин В. В., Закирова Г. С. Повышение эффективности систем улавливания паров нефти при товарно-транспортных операциях на нефтеналивных терминалах // Записки Горного института. — 2024. — Т. 265. — С. 121—128. DOI: 10.31897/PMI.2023.29.
18. Рубцов В. В., Ле Вьет Хай, Чан Ван Хан Экспериментальная оценка формирования взрывоопасной среды над плавающей крышей резервуара для хранения нефти в процессе откачки при пожаре соседнего резервуара // Технологии техносферной безопасности. — 2022. — № 1(95). — С. 8—21. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.8-21.
19. Кобылкин Н. И. Анализ причин взрывов цистерн и резервуаров при перегрузке нефтепродуктов [Электронный ресурс] // Промприбор — технологии и оборудование для нефтебаз : [сайт]. URL: https://www.prompribor.ru/images/o_kompanii/statyi/analiz_vzrivov.pdf (дата обращения: 10.06.2024).

20. Шавердо О. В., Бирюк В. А., Короткевич С. Г. Исследование причин воспламенения паровоздушной смеси светлых нефтепродуктов при наполнении автоцистерн // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. — 2023. — № 2(54). — С. 79–87. DOI: 10.54422/1994-439X.2023.2-54.79-87.

21. Клубань В. С., Ле В. Х., Нгуен Л. З., Панасевич Л. Т. Оценка пожарной опасности резервуарных парков для хранения нефти в Социалистической Республике Вьетнам / Гражданская оборона на страже мира и безопасности: Материалы IV Международной научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню гражданской обороны. — М., 2020. — С. 285–294.

22. Баловцев С. В. Мониторинг аэрологических рисков аварий на угольных шахтах // Горные науки и технологии. — 2023. — Т. 8. — № 4. — С. 350–359. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.

23. Рыбичев А. А. К вопросу оценки влияния тяжелых углеводородов на взрывчатость пылеметановоздушных смесей // Уголь. — 2023. — № 2. — С. 41–44. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-2-41-44.

24. Juganda A., Strebinger C., Brune J. F., Gregory E. B. Computational fluid dynamics modeling of a methane gas explosion in a full-scale, underground longwall coal mine // Mining, Metallurgy & Exploration. 2022, vol. 39, pp. 897–916. DOI: 10.1007/s42461-022-00587-z.

25. Wang H., Cheng S., Wang H., He J., Fan L., Danilov A. S. Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction // Fuel. 2023, vol. 338, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127273.

26. Романченко С. Б., Нагановский Ю. К., Корнев А. В. Инновационные способы контроля пылевзрывобезопасности горных выработок // Записки Горного института. — 2021. — Т. 252. — С. 927–936. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.

27. Баловцев С. В., Скопинцева О. В., Коликов К. С. Управление аэрологическими рисками в подготовительных выработках угольных шахт // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 1. — С. 107–116. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-107-116.

28. Гендлер С. Г., Борисовский И. А. Оценка влияния температурных условий на естественную вентиляцию глубоких карьеров Арктической зоны // Устойчивое развитие горных территорий. — 2022. — Т. 14. — № 2. — С. 218–227. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.

29. Каледина Н. О., Малашкина В. А. Индикаторная оценка надежности функционирования шахтных вентиляционно-дегазационных систем // Записки Горного института. — 2021. — Т. 250. — С. 553–561. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.

30. Sidorenko A. A., Dmitriev P. N., Sirenko Y. G. Predicting methane emissions from multiple gas-bearing coal seams to longwall goafs at russian mines // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2021, vol. 16, no. 8, pp. 851–857.

31. Kazanin O. I., Sidorenko A. A., Vinogradov E. A. Choosing and substantiating the methods of managing gas emission in the conditions of the Kotinskaya Mine of JSC SUEK – Kuzbass // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1822–1827.

32. Sidorenko S., Trushnikov V., Sidorenko A. Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams // Sustainability (Switzerland). 2024, vol. 16, no. 8, article 3457. DOI: 10.3390/su16083457.


33. Smirnyakov V. V., Smirnyakova V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia // International Journal of Civil Engineering and Technology. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1917–1929.

34. Baiwei Lei, Chao Li, Zheng Wang, Bing Wu Study on the effect of venting conditions on methane-air explosion characteristics in full-scale mine tunnel // Thermal Science and Engineering Progress. 2024, vol. 47, article 102349. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.102349.

35. Karacan C. O. Predicting methane emissions and developing reduction strategies for a Central Appalachian Basin, USA, longwall mine through analysis and modeling of geology and degasification system performance // International Journal of Coal Geology. 2023, vol. 270, article 104234. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104234.

36. Guoliang Zhang, Jin Guo, Jiaqing Zhang, Yi Guo, Changhai Li, Su Zhang Experimental study on flame propagation through stratified crude oil vapor in a horizontal duct // Fuel. 2021, vol. 294, article 120531. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120531.

37. Gridina E. B., Rudakov M. L., Rumiantseva A. M. Evaluation of stability of sides of quarries and dumps on the basis of a risk-oriented approach // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020, no. 4, pp. 47–52. DOI: 10.33271/nvngu/20204/047.

38. 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 // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, no. 1, pp. 107 – 115. DOI: 10.33271/nvngu/2022-1/107. 

REFERENCES

1. Fomin A. I., Grunskoy T. V. Methodical recommendations on the assessment of the risk of occupational diseases in underground personnel at thermal shaft method of extraction of high-viscosity oil. *Bulletin of Scientific center VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2019, no. 1, pp. 82 – 89. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2019.18.99.008.
2. Alabyev V. R., Kruk M. N., Bazhina T. P., Semenov A. S., Demin V. I. Economic efficiency of the application of artificial air cooling for normalization of thermal conditions in oil mines. *Scientia Iranica*. 2020, vol. 27, no. 3, pp. 1606 – 1615. DOI: 10.24200/SCI.2018.50549.1753.
3. Galkin A. F., Kurta I. V., Pankov V. Yu., Ilinov M. D. Oil flow influence on accuracy of forecasting mine air temperatures. *Oil Industry Journal*. 2020, no. 4, pp. 98 – 100. [In Russ]. DOI: 10.24887/0028-2448-2020-4-98 – 100.
4. Abashin A. N., Rudakov M. L., Stepanov I. S. Assessment of the occupational risk conditioned by heating microclimate in the mine workings of Yaregsky deposit oil mines. *Occupational Safety in Industry*. 2018, no. 7, pp. 67 – 73. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2018-7-67-73.
5. Fomin A. I., Zhuikov A. E., Grunskoy T. V. Research of results of medical examinations for assessment of risk of professional diseases of workers involved in thermal mining oil production conditions. *Bulletin of Scientific center VostNII for Industrial and Environmental Safety*. 2021, no. 4, pp. 58 – 66. [In Russ]. DOI: 10.25558/VOSTNII.2021.20.11.006.
6. Grunskoy T. V., Kaplina M. V., Sokhodon G. V. Assessment of severity and tension of labour at workplaces of underground personnel of Yaregskiy oil mines. *Resources of the European North. Exploration Technologies and Economics*. 2017, no. 3, pp. 35 – 55. [In Russ].
7. Fomin A. N., Nor E. V., Grunskoy T. V. Considering the synergetic effects at occupational risk assessment in oil mines. *Occupational Safety in Industry*. 2021, no. 9, pp. 89 – 94. [In Russ]. DOI: 10.24000/0409-2961-2021-9-89-94.
8. Myakov V. V., Korshunov G. I., Kabanov E. I. Analysis of working conditions of employees engaged in thermal shaft extraction of high-viscosity oil. *XXI century: Resumes of the Past and Challenges of the Present plus*. 2023, vol. 12, no. 4(64), pp. 222 – 228. [In Russ].
9. Sednev D. Reconstruction of oil mines No. 1, 2 and 3. Relationship of industrial fatalities and quality of design documentation fulfilment. Analysis of errors. *Gornoe ekho*. 202, no. 1(82), pp. 139 – 142. [In Russ]. DOI: 10.7242/echo.2021.1.25.
10. Konoplev Y. P., Demchenko A. G., Demchenko A. A. Oil mine – a technology that is capable of providing half of oil production in the 21st century in the open and developed fields of Russia. *Nedropolzovanie XXI vek*. 2020, no. 1(83), pp. 46 – 55. [In Russ].
11. Nguyen M. T., Nguyen D. L. T., Xia C., Nguyen T. B., Shokouhimehr M., Sana S. S., Grace A. N., Aghbashlo M., Tabatabaei M., Sonne C., Kim S. Y., Lam S. S., Le Q. V. Recent advances in asphaltene transformation in heavy oil hydroprocessing: Progress, challenges, and future perspectives. *Fuel Processing Technology*. 2021, vol. 213, article 106681. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106681.
12. Vorobiev A. E., Dzhimieva R. B. Innovative technologies of development of deposits of combustible slate and high-viscosity oil mining. *RUDN Journal of Engineering Research*. 2009, no. 3, pp. 5 – 16. [In Russ].
13. Sytnik S. S., Marinin S. Y. Research results of the fire safety state at oil-refining objects. *Scientific Works of the Kuban State Technological University*. 2019, no. 7, pp. 370 – 386. [In Russ].
14. Khodzhaeva G. K. *Otsenka riska avariynosti nefteprovodnykh sistem v aspekte geodinamicheskikh protsessov*: Monografiya [Accident risk assessment of oil pipeline systems in the aspect of geodynamic processes], Nizhnevartovsk, 2016, 132 p.
15. Duplyakov G. S., Elfimova M. V., Peshkov A. V. Analysis of occurrence of accidents, followed by fire and explosion in the warehouses of petroleum and petroleum products. *Siberian Fire and Rescue Bulletin*. 2020, no. 1(16), pp. 42 – 47. [In Russ].
16. Nazarov V. P., Korolchenko D. A., Shvyrkov S. A., Tangiev M. M., Petrov A. P. Features of assessing the level of fire and explosion safety of tanks before hot works. *Fire and Explosion Safety*. 2021, no. 6, pp. 52 – 60. [In Russ]. DOI: 10.22227/0869-7493.2021.30.06.52-60.

17. Pshenin V. V., Zakirova G. S. Improving the efficiency of oil vapor recovery units in the commodity transport operations at oil terminals. *Journal of Mining Institute*. 2024, vol. 265, pp. 121 – 128. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2023.29.
18. Rubtsov V. V., Le Viet Hai, Tran Van Han. Experimental evaluation of the formation of an explosive environment over the floating roof of an oil storage tank during pumping out of a neighboring tank in case of fire. *Technology of technosphere safety*. 2022, no. 1(95), pp. 8 – 21. [In Russ]. DOI: 10.25257/TTS.2022.1.95.8-21.
19. Kobylkin N. I. *Analiz prichin vzryvov tsistern i rezervuarov pri peregruzke nefteproduktov* [Analysis of the causes of explosions of tanks and reservoirs during oil products reloading], available at: https://www.prompribor.ru/images/o_kompanii/statyi/analiz_vzryvov.pdf (accessed 10.06.2024). [In Russ].
20. Shaverdo O. V., Biruk V. A., Korotkevich S. G. Analysis of causes of ignition of gas-vapour mixtures of light oil products during tank-truck filling. *Emergency Situations: Prevention and Elimination*. 2023, no. 2(54), pp. 79 – 87. [In Russ]. DOI: 10.54422/1994-439X.2023.2-54.79-87.
21. Kluban V. S., Le Viet Hai, Nguyen Le Duy, Panasevich L. T. Fire hazard assessment of oil storage tank farms in the Socialist Republic of Vietnam. *Grazhdanskaya oborona na strazhe mira i bezopasnosti: Materialy IV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchennoy Vsemirnomu dnyu grazhdanskoy oborony* [Civil Defence at the Guard of Peace and Security: Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference on the World Day of Civil Defence], Moscow, 2020, pp. 285 – 294. [In Russ].
22. Balovtsev S. V. Monitoring of aerological risks of accidents in coal mines. *Mining Science and Technology (Russia)*. 2023, vol. 8, no. 4, pp. 350 – 359. [In Russ]. DOI: 10.17073/2500-0632-2023-10-163.
23. Rybichev A. A. On the question of evaluation of the influence of heavy hydrocarbons on the explosibility of dust-methane-air mixtures. *Ugol'*. 2023, no. 2, pp. 41 – 44. [In Russ]. DOI: 10.18796/0041-5790-2023-2-41-44.
24. Juganda A., Strebinger C., Brune J. F., Gregory E. B. Computational fluid dynamics modeling of a methane gas explosion in a full-scale, underground longwall coal mine. *Mining, Metallurgy & Exploration*. 2022, vol. 39, pp. 897 – 916. DOI: 10.1007/s42461-022-00587-z.
25. Wang H., Cheng S., Wang H., He J., Fan L., Danilov A. S. Synthesis and properties of coal dust suppressant based on microalgae oil extraction. *Fuel*. 2023, vol. 338, pp. 1 – 10. DOI: 10.1016/j.fuel.2022.127273.
26. Romanchenko S. B., Naganovskiy Y. 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. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.6.14.
27. Balovtsev S. V., Skopintseva O. V., Kolikov K. S. Aerological risk management in preparation mining of coal mines. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 1, pp. 107 – 116. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-1-107-116.
28. Gendler S. G., Borisovskiy I. A. Estimated impact of temperature conditions on deep pits natural ventilation in the arctic. *Sustainable Development of Mountain Territories*. 2022, vol. 14, no. 2, pp. 218 – 227. [In Russ]. DOI: 10.21177/1998-4502-2022-14-2-218-227.
29. 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. [In Russ]. DOI: 10.31897/PMI.2021.4.8.
30. Sidorenko A. A., Dmitriev P. N., Sirenko Y. G. Predicting methane emissions from multiple gas-bearing coal seams to longwall goafs at russian mines. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2021, vol. 16, no. 8, pp. 851 – 857.
31. Kazanin O. I., Sidorenko A. A., Vinogradov E. A. Choosing and substantiating the methods of managing gas emission in the conditions of the Kotinskaya Mine of JSC SUEK – Kuzbass. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017, vol. 12, no. 6, pp. 1822 – 1827.
32. Sidorenko S., Trushnikov V., Sidorenko A. Methane emission estimation tools as a basis for sustainable underground mining of gas-bearing coal seams. *Sustainability (Switzerland)*. 2024, vol. 16, no. 8, article 3457. DOI: 10.3390/su16083457.
33. Smirnyakov V. V., Smirnyakova V. V., Pekarchuk D. S., Orlov F. A. Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in Russia. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2019, vol. 10, no. 2, pp. 1917 – 1929.

34. Baiwei Lei, Chao Li, Zheng Wang, Bing Wu Study on the effect of venting conditions on methane-air explosion characteristics in full-scale mine tunnel. *Thermal Science and Engineering Progress*. 2024, vol. 47, article 102349. DOI: 10.1016/j.tsep.2023.102349.

35. Karacan C. O. Predicting methane emissions and developing reduction strategies for a Central Appalachian Basin, USA, longwall mine through analysis and modeling of geology and degasification system performance. *International Journal of Coal Geology*. 2023, vol. 270, article 104234. DOI: 10.1016/j.coal.2023.104234.

36. Guoliang Zhang, Jin Guo, Jiaqing Zhang, Yi Guo, Changhai Li, Su Zhang Experimental study on flame propagation through stratified crude oil vapor in a horizontal duct. *Fuel*. 2021, vol. 294, article 120531. DOI: 10.1016/j.fuel.2021.120531.

37. Gridina E. B., Rudakov M. L., Rumiantseva A. M. Evaluation of stability of sides of quarries and dumps on the basis of a risk-oriented approach. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020, no. 4, pp. 47 – 52. DOI: 10.33271/nvngu/20204/047.

38. 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. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2022, no. 1, pp. 107 – 115. DOI: 10.33271/nvngu/2022-1/107.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Мяков Владислав Владимирович¹ – аспирант,

e-mail: s215061@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3144-980X,

Коршунов Геннадий Иванович¹ – д-р техн. наук,

профессор, e-mail: Korshunov_GI@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2074-9695,

Кабанов Евгений Игоревич¹ – канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Kabanov_EI@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7580-9099,

Родионов Владимир Алексеевич¹ – канд. техн. наук,

доцент, e-mail: Rodionov_VA@spmi.pers.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2398-5829,

¹ Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II.

Для контактов: Мяков В.В., e-mail: s215061@stud.spmi.ru.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

V.V. Myakov¹, Graduate Student,

e-mail: s215061@stud.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0002-3144-980X,

G.I. Korshunov¹, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

e-mail: Korshunov_GI@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2074-9695,

E.I. Kabanov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Kabanov_EI@pers.spmi.ru,

ORCID ID: 0000-0001-7580-9099,

V.A. Rodionov¹, Cand. Sci. (Eng.), Assistant Professor,

e-mail: Rodionov_VA@spmi.pers.ru,

ORCID ID: 0000-0003-2398-5829,

¹ Empress Catherine II Saint-Petersburg Mining University,

199106, Saint-Petersburg, Russia.

Corresponding author: V.V. Myakov, e-mail: s215061@stud.spmi.ru.

Получена редакцией 18.06.2024; получена после рецензии 22.07.2024; принята к печати 10.09.2024.

Received by the editors 18.06.2024; received after the review 22.07.2024; accepted for printing 10.09.2024.